

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

До захисту допущено

В.о. завідувача кафедри

_____ Юлія ЯМНЕНКО

(підпис)

(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

" _____ " _____ 2020 р.

Дипломний проєкт

на здобуття першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

Спеціальність 171 Електроніка

(код та назва спеціальності)

Спеціалізація Електронні прилади та пристрої

на тему: Сонячні елементи на наночастинках та квантових точках

Виконав (-ла): студент (-ка) IV курсу, групи ДЕ-62

Микола ПОДОБАЙЛО

(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Керівник доцент, доцент, к.т.н. Вячеслав ЧАДЮК

(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Консультант Технічний розділ

(назва розділу) (посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Рецензент

_____ (посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Консультант

з нормоконтролю доцент, доцент, к.т.н. Вячеслав ЧАДЮК

(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість аркушів	Примітка
1					Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ			Пояснювальна записка	53	
3	A4	ДП.ДЕ62.008.000 Е1			Схема електрична структурна	1	
4	A4	ДП.ДЕ62.008.000 Е3			Схема електрична принципова	1	

Національний технічний університет України

**“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра електронних пристроїв та систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

Спеціалізація Електронні прилади та пристрої

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Юлія ЯМНЕНКО
(підпис) (ім'я ПРИЗВИЩЕ)

" ____ " _____ 2020 р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

Подобайло Микола
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

1. Тема проєкту Сонячні елементи на наночастинках та квантових точках

Керівник проєкту доцент, доцент, к.т.н. Вячеслав ЧАДЮК,
(посада, науковий ступень, вчене звання, ім'я ПРИЗВИЩЕ)

затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 року № 1196-с.

Термін подання студентом проєкту 5.06.2020 р.

3. Вихідні дані до проєкту Проаналізувати можливості розроблення сонячних батарей на основі нанорозмірних об'єктів. _____

4. Зміст пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити)
Зробити огляд використання нанотехнологій в сонячній енергетиці. Оцінити оптичну ефективність сонячних батарей на основі наночастинок та квантових точок.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____

Креслення структурної схеми вимірювальної установки. 2 плакати.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Ім'я ПРІЗВИЩЕ, посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технічний			

7. Дата видачі завдання 04.02.2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Строки виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд науково-технічної інформації по сонячним батареям	04.02–15.03.2020	
2	Аналіз використання нанотехнологій в сонячній енергетиці	16.03–15.04.2020	
3	Розроблення схеми установки для визначення оптичної ефективності сонячної батареї	16.04–10.05.2020	
4	Розрахунок оптичної ефективності	11.05–25.05.2020	
5	Підготовка текстової та графічної документації проєкту.	26.05–04.06.2020	

Студент

(підпис)

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту

(підпис)

(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

В дипломному проєкті представлено огляд науково-технічної літератури по сонячним елементам, розроблених з використанням наночастинок та квантових точок.

Перспективами використання та розвитку таких засобів є підвищення ефективності використання сонячної енергії з подальшим перетворенням для отримання електричної енергії. Це є важливим аспектом у розвитку сучасних технологій. Адже людство прагне до максимально можливого зменшення впливу будь-якої своєї діяльності на екологічний стан довкілля. Тому підвищення ефективності сонячних елементів є вагомим рушієм в цьому напрямку.

Перше покоління сонячних елементів було створене з використанням монокристалічних підкладок кремнію (с-Si). Завдяки використанню полі- та мульти- кристалам кремнію вдалось знизити вартість сонячних елементів. Однак це вплинуло на ефективність. Друге покоління було засноване на технології тонких плівок, в них використовують такі матеріали, як: плівки кремнію на основі аморфного кремнію (а-Si), плівки з основою телуриду кадмію (CdTe) та плівки селеніду міді індію галію (CuInGaSe₂). Ця технологія допомогла підвищити коефіцієнт корисної дії модулів сонячних батарей, а також зменшити витрати на виготовлення. Третє покоління використовує нано-технології, нанокристали і нанорозмірні композитні структури. Ці структури будуються на квантових точках і матеріалах нанопоруватих, також вони мають змінені оптоелектронні властивості. Також вони використовуються в сонячних елементах, які мають смуги поглинання призводять до покращення ефективності перетворення енергії на 65%, а це практично подвоює якість існуючих сонячних батарей.

ANNOTATION

The diploma project presents a review of scientific and technical literature on solar cells, developed using nanoparticles and quantum dots.

Prospects for the use and development of such tools are to increase the efficiency of solar energy with subsequent conversion to generate electricity. This is an important aspect in the development of modern technologies. After all, humanity seeks to minimize the impact of any of its activities on the ecological state of the environment. Therefore, increasing the efficiency of solar cells is a significant driver in this direction.

The first generation of solar cells was created using monocrystalline silicon (c-Si) substrates. Thanks to the use of poly- and multi-crystals of silicon, it was possible to reduce the cost of solar cells. However, this affected efficiency. The second generation was based on thin film technology, using materials such as amorphous silicon (a-Si) silicon films, cadmium telluride (CdTe) films and indium gallium copper selenide films (CuInGaSe₂). This technology has helped increase the efficiency of solar panels, as well as reduce manufacturing costs. The third generation uses nano-technologies, nanocrystals and nanosized composite structures. These structures are based on quantum dots and nanoporous materials, and they also have altered optoelectronic properties. They are also used in solar cells that have absorption bands leading to a 65% improvement in energy conversion efficiency, which virtually doubles the quality of existing solar panels.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	4
Вступ.....	5
1. Сонячні елементи з використанням нанотехнологій	8
1.1. Поруватий кремній	11
1.2. ТПО на кремнії та характеристики їх осадження.....	16
1.3. Квантові точки.....	22
1.4. Сонячні концепції клітин	22
Висновки до розділу 1	26
2. Застосування тонких плівок з наночастинок кремнію для підвищення ефективності сонячних елементів	27
2.1. Підготовка зразків і методи вимірювання.....	27
2.2. Результати вимірювань.....	30
2.2.1. Інтегральна по спектру ефективність сонячних елементів	30
2.3. Спектральний відгук сонячних елементів.....	32
2.3.1. Темнові вольт-амперні характеристики.	32
2.3.2 Оптичні характеристики лицевої поверхні СЕ.	34
2.3.3. Квантова ефективність СЕ.	37
2.4. Аналіз вмісту дефектів в досліджуваних сонячних елементах.....	38
Висновки до розділу 2	43
3. Контроль оптичної ефективності сонячної батареї	45
3.1 Розрахунок енергії сонячного випромінювання, яка може бути перетворена сонячною батареєю в електричну	45
3.2 Структурна схема системи вимірювання прямого та розсіяного сонячного випромінювання	48
Висновки до розділу 3	51
ВИСНОВКИ.....	52
4. Перелік використаної літератури	54

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

СЕ – сонячний елемент;

ЛСЕ – лабораторний сонячний елемент;

КСЕ – комерційний сонячний елемент;

ТПО – тонкі провідні оксиди;

ВКЕ – внутрішня квантова ефективність;

СВ – спектральний відгук;

СQD – колоїдні квантові точки.

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк.
Змн.	Анк.	№ док-м.	Підпис	Дата		4

Вступ

Виготовлення сонячних елементів полягає у використанні технології бар'єру Шотткі, або на р-п переході. Це дозволяє використовувати фотоелектричні властивості напівпровідника (кремнію).

Перше покоління сонячних елементів (СЕ) характеризуються 12-16 відсотковою ефективністю перетворення сонячної енергії. Вони засновані на кремнієвих підкладках, зазвичай це монокристали кремнію (с-Si) або об'ємні полікристалічні підкладки. Їх ефективність залежить від якості пластини та технології, за якої вони виготовляються. Саме удосконалення процесу виробництва є ключовим фактором у досягненні теоретичних 33,7% ККД таких кремнієвих одноперехідних (р-п) елементів.

Велика кількість високочистого кремнію, який є дорогим, є основним недоліком такої технології. Виробництво за цією технологією доведене до ідеалу, тому поліпшення існуючих процесів стає все більш складним. Останнім варіантом оптимізації таких СЕ є здешевлення використовуваної сировини. Тому зараз досліджуються можливості використовувати полі- та мультикристалічного кремнію. Ефективність таких матеріалів є меншою, однак вони потребують невисокого ступеню очищення.

Друге покоління СЕ використовує тонко плівкові технології, яке дозволяє використовувати різні матеріали, одним з яких є аморфний кремній. Така технологія є значно економічно вигіднішою, оскільки використовується менша кількість матеріалів при виробництві, а якщо виробництво є серійним, то можливе широке застосування автоматизаційних процесів. Також, оскільки у даній технології використовуються гнучкі матеріали, це дозволяє розширити спектр застосування таких СЕ.

Для виготовлення тонко плівкових СЕ використовуються плівки на основі: телуриду кадмію (CdTe), аморфного кремнію (а-Si) та міді-інді-галію

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

(CIGS). Їх ККД становить 10-11%, 10%, 12-13% відповідно. Популярність тонко плівкових кремнієвих елементів є найвищою (80%) у зв'язку з поширеністю кремнію у земній корі, через що і його вартість є нижчою. Також кремнієві плівки є більш стабільними у роботі ніж багатошарові структури. Варто зазначити, що кадмієві структури потребують додаткової утилізації на виробництві, оскільки матеріал є токсичним.

Отже, розвиток сонячних елементів на основі неорганічних тонких плівок залежить від стабілізації параметрів використовуваних матеріалів та покращення технології виробництва.

Використання нано-технологій дає змогу створювати сонячні елементи та системи таких елементів, що міститимуть велику кількість р-п переходів (теоретичний ідеальний варіант передбачає сотні таких шарів), в яких кожен буде відповідати за малий діапазон довжин хвиль світла всього спектру. Основою для таких елементів є сполуки галію, такі як: фосфід індію галію, арсенід галію, та ін.

Одним з шляхів використання такої технології є використання призм, які можуть розкладати світло на потрібні спектри, які будуть концентруватись на одно перехідних елементах з різним діапазоном перетворення випромінювання. Використання наземних комерційних продуктів було розпочато у 2014 році і показало чудові результати. В теорії ККД СЕ з двох шарів складає 42%, тришарові елементи – 49%, а структури з безліччю шарів несфокусованого світла – 68%. Уже при використанні концентраторів сонячного випромінювання ефективність збільшується до 86,8%. Практичні дані для багатошарових не фокусуючих структур становить 30%. Однак вартість такої технології являється в 100 разів більше кремнієвої. Тому в багато перехідних модулях використовуються концентратори в 500-1000 разів.

Тобто застосування наноструктурованих матеріалів для СЕ передбачає малорозмірні нанокомпозитні структури. Тому використання квантових

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Апк
Змн.	Апк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

точок нанокластерів у нанопористих матеріалах стає важливим у перетворенні сонячної енергії.

Квантові точки впливають на отримання змінених оптоелектричних властивостей у малорозмірних нанокомпозитних структурах. Можуть застосовуватися в СЕ, які мають смуги поглинання з можливістю пристосуватися до довжини хвилі світла, що опромінює елемент. Теоретично ці структури призводять до збільшення ефективності перетворення сонячної енергії до 65%, проте над цим ведеться велика кількість досліджень.

Технічним завданням проєкту є підвищення ефективності сонячних елементів, що розробляються з використанням нанoeлектроніки, а саме – наночастинок кремнію

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк.
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

1. Сонячні елементи з використанням нанотехнологій

За структурою, типом та комбінацією контактів розрізняють декілька типів сонячних елементів. Наприклад, застосовують малорозмірні композиційні структури, у складі яких є пористий кремній, його вирощують на монокристалічному кремнії, це впливає на покращення здатності поглинати сонячну енергію.

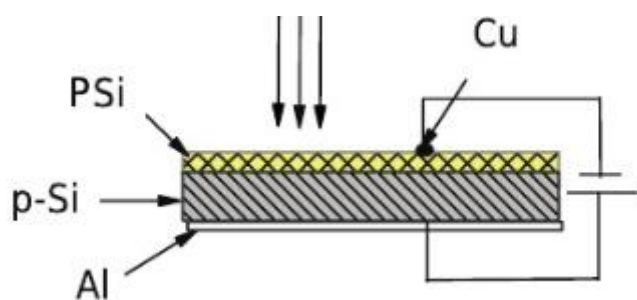


Рис. 1.1. – Структура сонячного елемента

Роботу цього елемента можна охарактеризувати так: світло неодноразово розсіюється на кристалітах, що містяться всередині пор, а також майже повністю там поглинається. Це обумовлено розмірами мікрокристалів, які становлять приблизно десятину від довжини хвилі, що падає.

Для оцінки СЕ використовуються спеціальні параметри і характеристики, які дозволяють оцінювати якості сонячних елементів різного типу. Спеціальними характеристиками є: вольт-амперна характеристика (ВАХ) та спектральна характеристика. Спеціальними параметрами є: ефективність (ККД), фактор заповнення (FF), напруга холостого ходу (V_{oc}), струм короткого замикання (I_{sc}), щільність струму короткого замикання (J_{sc}).

Вираз (1) описує світлову ВАХ сонячного елемента відповідно однодіодній моделі СЕ. ВАХ (Рис. 1.2.) відображає зв'язок між вихідним струмом сонячного елемента і напругою на його контактах.

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Апк
Змн.	Апк.	№ док.	Піппис	Дата		8

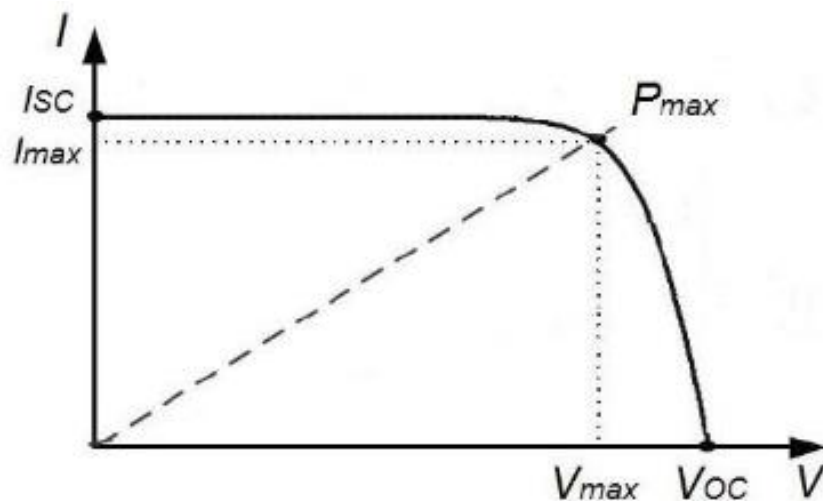


Рис. 1.2. – Типова ВАХ СЕ

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

де I – струм навантаження; T – температура; n – фактор ідеальності випрямного р-п переходу; I_s – струм насичення; V – напруга.

Ефективна робота СЕ потребує виконання низки умов:

- для забезпечення великої кількості поглинання сонячної енергії в межах одного шару, необхідно, щоб оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника був високим;
- повинні ефективно збиратись генеровані при освітленні електрони і дірки на електродах з двох боків активного шару;
- СЕ необхідно забезпечити високий бар'єр в напівпровідниковому переході;
- для зменшення втрат потужності повний опір R_s , який включається послідовно до сонячного елементу (без опору навантаження) має бути малим;
- для незалежності від шунтуючих опорів R_{sh} та замикань на характеристиках елементу необхідно, щоб тонка плівка була однорідна на всій активній площі СЕ.

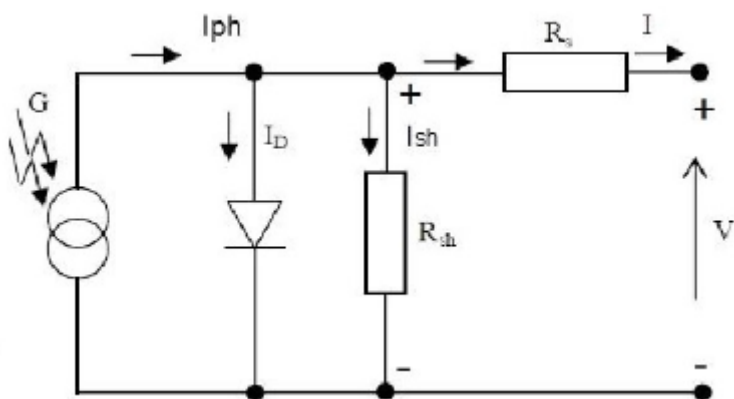


Рис. 1.3. – Еквівалентна електрична схема сонячного елемента

Тонкі провідні оксиди, такі як: In_2O_3 , SnO_2 , ZnO , In_2S_3 , TiO_2 , CdO , ITO , IFO дозволяють покращити ефективність фотоперетворювачів завдяки широкій зоні напівпровідників ($E_g=2,0\text{-}3,7\text{eV}$). Вони забезпечують хорошу прозорість ($>80\%$) для видимого діапазону світла, значний коефіцієнт заломлення ($n=1,6\text{-}2,3$), невелике значення поверхневого опору ($R_{\text{пов}}=10\text{-}70 \text{ Ом/кв}$), різноманітні технології низькотемпературних методів виробництва ($T=380\text{-}970\text{K}$). Процес синтезу, склад середовища, умови виготовлення впливають на параметри плівок широкозонних напівпровідників. [2]

Вираз, що описує максимальну потужність, вироблену СЕ:

$$P_{\max} = I_{\max} \cdot V_{\max} = FF \cdot I_{\text{sc}} \cdot V_{\text{oc}}, \quad (2)$$

1.1. Поруватий кремній

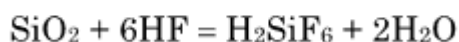
Однією з форм матеріалу Si є поруватий кремній (PSi), у якому є нанопори в мікроструктурі. Це дозволяє збільшувати площу поверхні відносно такого ж об'єму. Його було виявлено в 1990 році і сформовано на пластиках кристалів кремнію завдяки електрохімічному травленню. Поруватому кремнію властива фотолюмінесценція та електролюмінесценція.

Серед багатьох способів фізичного та хімічного отримання пористих напівпровідників, найкращими є хімічні та електрохімічні. Вони характеризуються такими перевагами:

Хімічне травлення

Хімічне травлення забезпечує одночасне протікання реакції з недисоційованими молекулами в розчині з атомами поверхні. У зв'язку з тим, що виникають нові зв'язки з реагентами, зникають зв'язки між об'ємними та поверхневими атомами. Через це поверхневі атоми переходять до розчину. Хімічне травлення передбачає анізотропне розчинення кремнію з активними OH або H₂O складовими. Відбувається це завдяки використанню водних розчинів у яких є органічний (гідразин, холін, Галлат амін, етилендіамін, гідроксид тетраметиламонію) або неорганічний (LiOH, NaOH, KOH, RbOH, CsOH, NH₄OH) компонент.

Для ізотропного травлення кремнію використовується кисле середовище, у якому містяться фторид-іони (HF) згідно рівнянь:

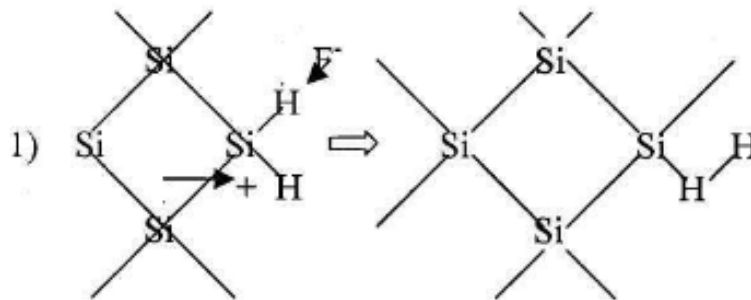


Електрохімічне травлення

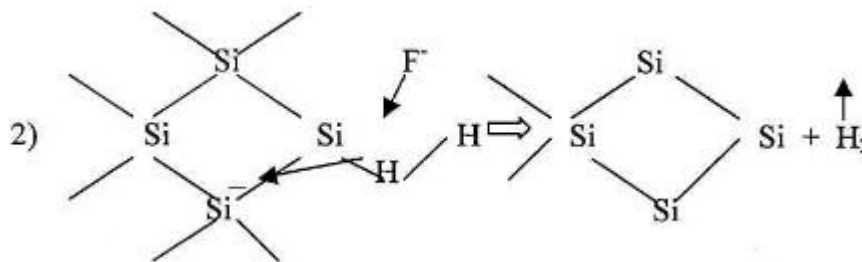
					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк.
Змн.	Анк.	№ докум.	Піппис	Дата		11

Найвикористовуваніший спосіб електрохімічного травлення кремнію є окислення кремнію із захопленням та ін'єкції дірок і електронів на поверхні кремнію в чотири етапи:

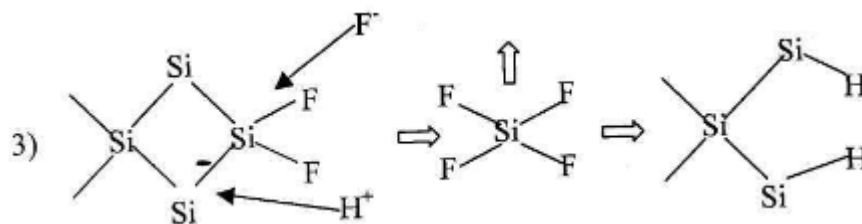
Першим є рух іонів флуору F^- до поверхні та захоплення дірок.



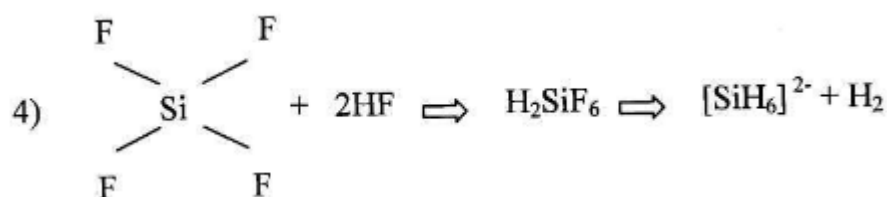
Другим є рух іонів F^- до поверхні, розрив зв'язків $Si-H$, інжекція дірок у кремній та утворення газоподібного H_2 .



Третім є розрив зв'язків $Si-Si$. утворення молекул SiF_4 і дифузія їх в розчин. Утворення зв'язків $Si-H$ з поверхневими атомами кремнію.



Четвертим є утворення водорозчинного комплексу.



Моделі для пояснення механізмів виникнення пористого кремнію діляться на групи:

- а) характеризують квантове обмеження носіїв заряду в Si кристалітах нанометричного розміру;
- б) характеризують локальну емісію, яка викликається колісіланами Si або гідридами, що створились на поверхні поруватого кремнію під час його росту через посивацію обірваних зв'язків на поверхні;
- с) характеризують виникнення специфічного типу Si-O-H з'єднань;
- д) з поєднанням теорії квантового обмеження носіїв та існування ділянок з локальними дефектами по поверхні так звані гібридні моделі, які більш досконало описують оптичні властивості поруватої плівки;
- е) для моделі з окисленням кремнію потрібні такі уточнення: дірки з поверхні кремнію при анодуванні досягають поверхні двома способами. Або безпосереднім рухом дірок до дна поруватого кремнію, або крізь структуру кремнієвих ниток до поверхні. Перший випадок передбачає незначний опір і швидке досягання межі кремнію, якою є електроліт, що знаходиться на дні пор, де дірки і приймають участь в реакції. Другий випадок вимагає подолання опору дірками між поруватим шаром і об'ємним кремнієм. Тому, дірки, при русі через кремнієві нитки, утворюють деяку густину струму на поверхні пор, що пов'язано з їх високою ефективною площею поверхні. Це призводить до підвищення активності електрохімічного травлення на дні поруватої структури.

Щоб ефективно контролювати температуру електроліту і електрохімічне травлення кремнію в цілому, безперервного відновлення концентрації електроліту біля поверхні зразка кремнію та контролювати його топографічні особливості рельєфу поверхні поруватого кремнію було розроблено і виготовлено установку, що схематичного зображена на Рис. 1.4.

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ локум.	Пілпис	Дата		13

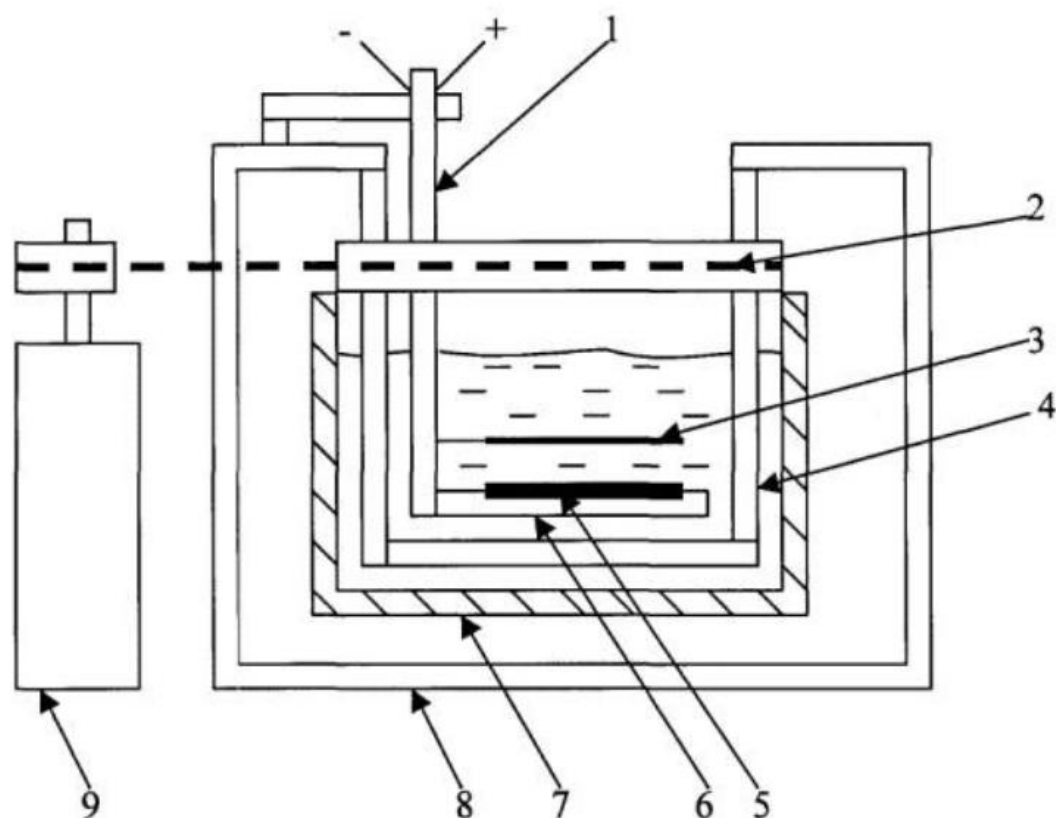


Рис. 1.4. – Схема пристрою для електрохімічного травлення кремнію: 2 – стрижень; 2 – пас; 3 – Pt дріт; 4 – обертова електролітична ванна; 5 зразок кремнію; 6 – утримувач; 7 – термостат; 8 – каркас; 9 електродвигун

У процесі травлення відбувається набування електролітом турбулентності надає: близько до нерухомої пластини, що надає:

1) однорідність температури електроліту та можливість її контролювати; 2) можливість електроліту оновлюватись у суміжних з пластиною шарах; 3) неможливість бульбашок водню блокувати поверхню зразка; 4) вплив на морфологію поруватого матеріалу параметру обертання електроліту.

Морфологія пор, тип структури та розмір залежать від деяких параметрів. Середовище та концентрація травлення є першим. Окислювач та концентрація – другим, час травлення – третім. АСМ мікроскопія дає змогу добре це побачити.

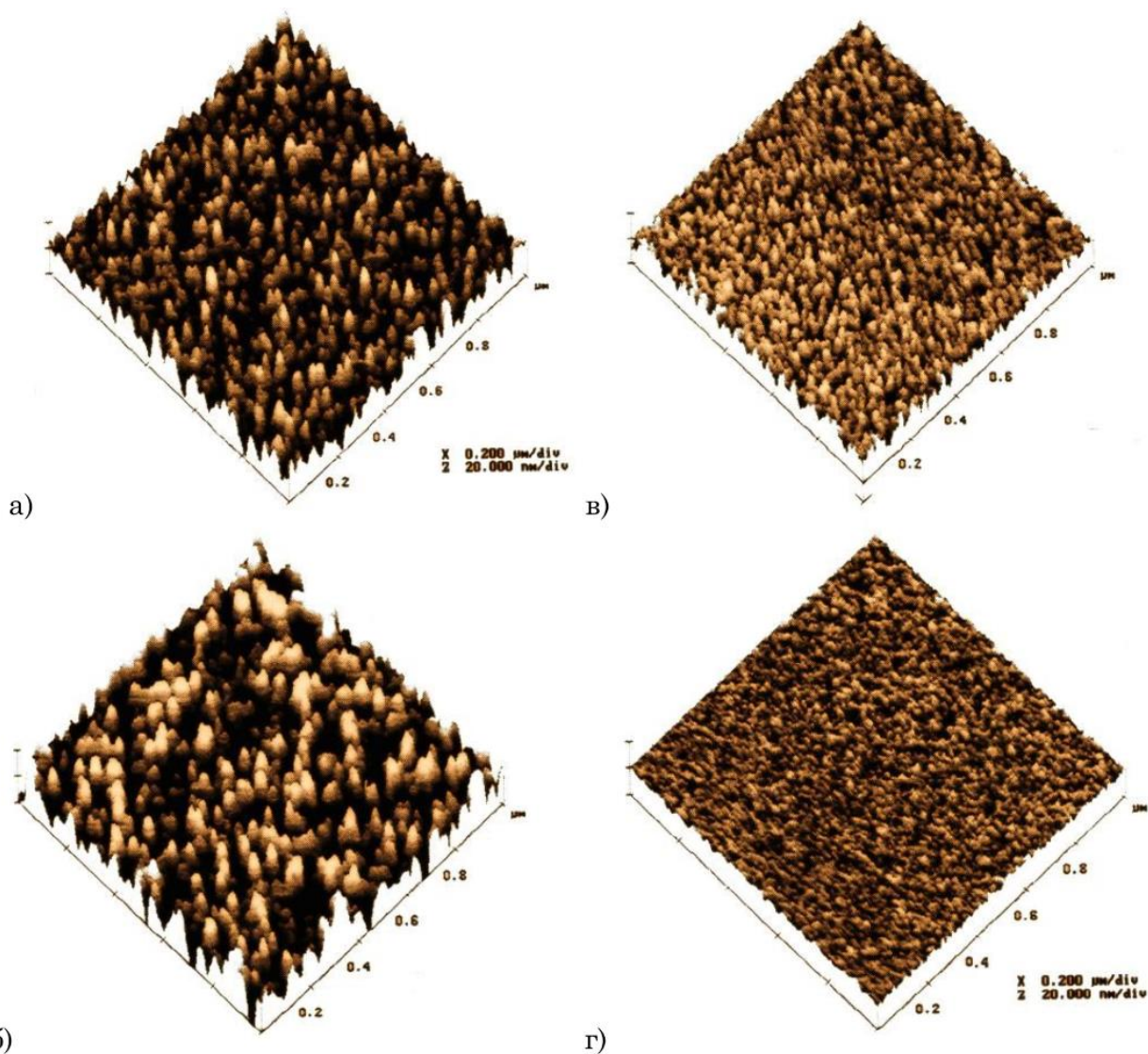


Рис. 1.5. – АСМ зображення поверхні зразка поруватого кремнію на кремній р – типу з питомим опором $0,05 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ та орієнтацією (100), отриманого в електроліті із складом HF (40%) $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (96%), HCl (38%) та H_2O . Густина струму анодування становила 50 мА/см^2 , тривалість анодування а- 5 с, б – 8 с, в – 14 с, г – 18 с

1.2. ТПО на кремнії та характеристики їх осадження

Клас матеріалів, які характеризуються шириною забороненої зони більшим за 3,1 еВ і високим рівнем прозорості (>80%), називаються тонкими провідними оксидами (ТПО). Утворення точкових дефектів забезпечує провідність ТПО. Типом таких дефектів є легуючі домішки заміщення або міжвузловий метал і вакансії кисню. Їх концентрація залежить від параметрів процесу осадження та режимів наступних термічних обробок. Отримане мінімальне теоретичне значення питомої провідності $2,5 \cdot 10^4 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$ є граничним, що є наслідком стримування переносу носіїв, які розсіюються на іонізованих домішках ($\mu < 90 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) та обмеження концентрації носіїв внаслідок зростання оптичного відбиття із збільшенням концентрації носіїв заряду ($n < 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ для прозорості >90%).

Для металу осадженого на кремнії прихильні деякі особливості. Вони застосовуються завдяки хорошій прозорості (>80%) для видимого діапазону довжин хвиль, коефіцієнт заломлення є значним ($n \approx 1,6-2,3$), значення поверхневого опору достатньо низьке ($R_{\text{пов}} \approx 10-70 \text{ Ом/кв}$), низькотемпературні технологічні методи є різноманітними ($T \approx 390-970 \text{ К}$). Порушуватиме кремній Psi/ТПО-переходу, що лежить в основі гетероструктур, дозволяє їм демонструвати широкий спектр властивостей.

Доступними ТПО являються: потенційними кандидатами для оптоелектронних застосувань, в особливості для сонячних батарей є ZnO та SnO₂. Там вони використовуються в якості прозорого і широзонного шару.

Ефективними просвітлюючими покриттями для монокристалічних і полікристалічних кремнієвих сонячних елементів є плівки на основі суміші матеріалів. Суміші використовуються в якості утворювачів плівки для антивідбиттєвих покриттів, що є гарною перспективою, адже зміна складу суміші, її концентрація, чи технологія нанесення дозволяють змінити оптичні

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Апк
Змн.	Апк.	№ док.	Піппис	Дата		16

параметри цього покриття. Напилення плівкових покриттів виконуються з використанням суміші двох випарників або з пресованих таблеток суміші. Оскільки компоненти мають різну температуру випаровування, то для отримання якісних результатів виконують пробні напилення, які змінюються технологією напилення.

Методами приготування ТПО є фізичне осадження з парової фази (PVD), метал –хімічне осадження з парової фази (MOCVD), спрей піроліз, напилення, імпульсно лазерне осадження, струменевий друк, електрохімічне осадження, метод золь-гель. [6]

Найпопулярнішим є метод спрей піролізу, що надає переваги в простоті та низькій вартості, крім того він забезпечує простий спосіб легування будь-якого елементу в необхідних пропорціях. Вона потребує розміщення у шафі з примусовою витяжною вентиляцією. (Рис. 1.6)

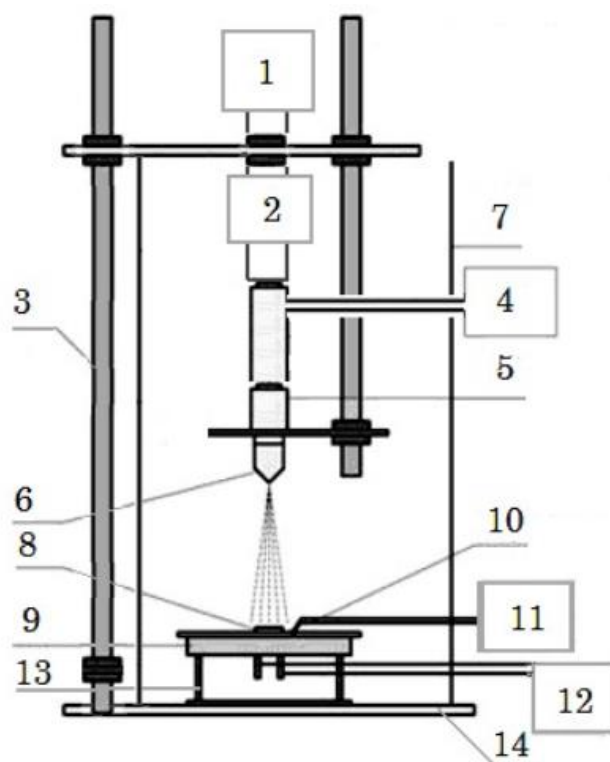


Рис. 1.6. – Схема системи спрей піролізу для осадження плівок ТПО: 1 – ємність з розчином; 2 – регулятор; 3 – штатив; 4 – компресор; 5 – ротаметр; 6 – аерограф; 7 – камера; 8 – підкладка; 9 – пластина-супутник; 10 – термопара; 11 – вимірювач температури; 12 – нагрівач; 13 – тримач; 14 – опора

ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ					Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата	17

Ізольований нагрівач (12) круглої форми діаметром 160мм задає температуру процесу. Він живиться від трансформатора, за допомогою якого регулюється напруга в електричному колі та плавно змінюється температура нагрівача. На нагрівачі також встановлено тримач підкладки (13) та сама підкладка (8), на яку наноситься плівка, та плістина-супутник (9) з приєднаною до неї хромель-алюмелевою термопарою (10). Цифровий вимірювач температури (11) з точністю до 1⁰С контролює температуру. Подача розчину з ємності (1) відбувається по системі трубопроводів з регулятором (2) та ротаметром (5) до аерографа (6), за допомогою якого можна регулювати потоки повітря та розчину. Аерограф закріплений так, що його можна обертати та пересувати. За подачу повітря по трубопроводу відповідає компресор (4). Камера (7) має специфічну форму та виготовлена з кварцевого скла, вона має кругле дно, а верх має конусне звуження. Вона стоїть на чотирьох прямих стрижнях, які вмонтовані в опору (14). Завдяки цьому відбувається обмін повітря з зовнішнім простором.

ТПО це вироджені широкозонні напівпровідники. Для них характерний поверхневий опір, який являє собою опір квадратної ділянки плівки при проходженні струму паралельно поверхні плівки та їх питома електропровідність визначається за виразом.

Щоб практично застосовувати плівки потрібно досягати оптимальних значень пропускання та електропровідності, які розраховуються за допомогою критерію якості: $\Phi_{TC} = T^{10}/R_S$, де T – пропускання на відповідній довжині хвилі; R_S – поверхневий опір.

Для отримання мінімального поверхневого опору необхідно збільшувати її товщину, концентрацію або рухомість носіїв заряду. На оптичне поглинання плівок ТПО також впливає кількість електронів. Ефективна оптична ширина забороненої зони виродженого напівпровідника розширюється з зростанням концентрації електронів внаслідок заповнення нижчих станів у зоні провідності електронами збудженими із мілких

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ локум.	Пілпис	Дата		18

донорних рівнів. Поглинання на цих станах зони провідності заборонено за принципом Паулі. Для випадків параболічних зон та прямої забороненої зони це, так званий, зсув Бурштейна-Мосса:

$$\Delta E_{BM} = \frac{h^2}{8} \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{2/3} \left(3 \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (3)$$

Згідно експериментальних даних роботи відбувається розширення забороненої зони, причиною чого, є зсув Бурштейна-Мосса, переважно це відповідає легованим плівкам оксиду цинку. Внаслідок високої концентрації та ефекту розсіювання на іонізованих домішках, відбувається звуження забороненої зони.

Поглинання світла вільними носіями обмежується прозорістю плівок ТПО на довгих хвилях випромінювання зі зростанням концентрації носіїв заряду.

Плазмова межа ТПО, яка знаходиться у ближній інфрачервоній ділянці. Згідно моделі Друде для вільних електронів, поглинання та відбиття електронного газу на частотах нижчих за плазмову частоту:

$$\omega_p = \left(\frac{ne^2}{\epsilon_{\infty}\epsilon_0\pi m_e^*} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Питому провідність згідно (3) підвищує більша електронна густина. Однак зсув плазмової межі у бік високих частот є наслідком значного поглинання вільних носіїв на коротких хвилях. Тому для отримання високої питомої провідності у плівках ТПО єдиним рішенням є збільшення рухомості. Крім того якщо ефективна маса залежить від зонної структури матеріалу плівки рухомість носіїв у плівках ТПО обмежена ефектом розсіювання на межах зерен у полікристалічному матеріалі, на домішках і фононах. Вплив розсіювання на межах зерен уповільнюється із зростанням розмірів зерен внаслідок зменшення площі міжзеренних меж.

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Для плівок ТПО, які використовуються у сонячних елементах з розсіюванням на фонах досить незначне у порівнянні з розсіюванням на домішках. Розсіювання на іонізованих домішках є переважним ефектом, який обмежує питому провідність високо легованих плівок ТПО. Для досягнення великих значень провідності при високій прозорості плівкові матеріали повинні мати малу ефективну масу електрону і високу кристалічну досконалість, яка дасть можливість підвищити рухомість.

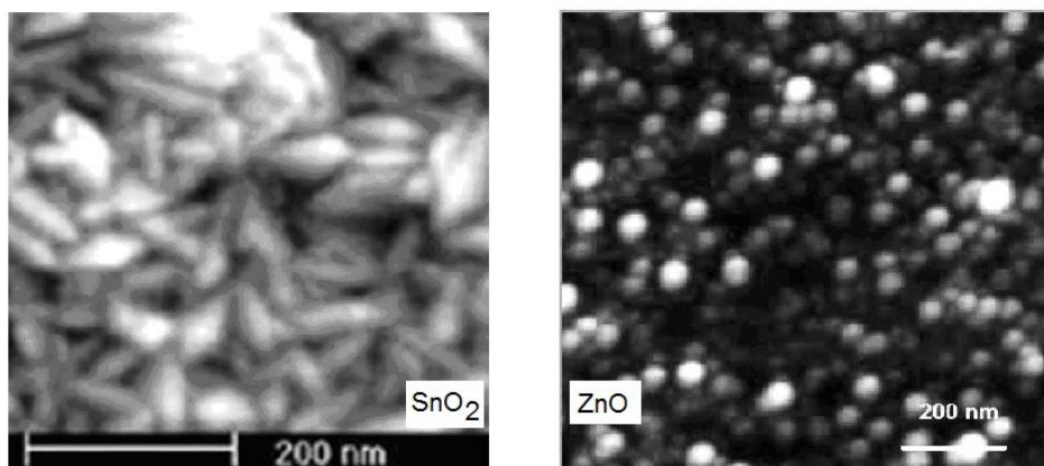


Рис. 1.7. – РЕМ зображення ТПО

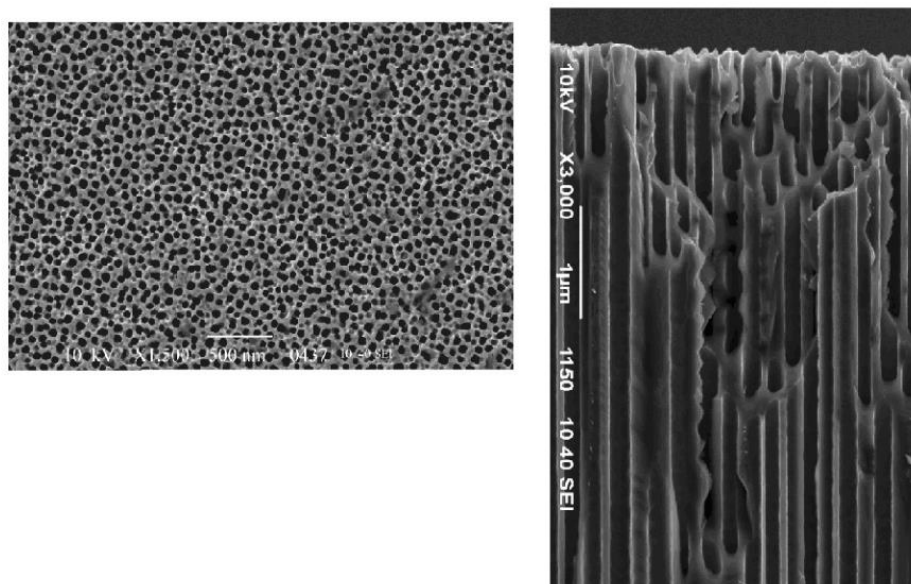


Рис. 1.8. – РЕМ зображення поруватого кремнію

На рисунку 1.7 зображені ТПО з використанням електронного мікроскопа. Широкозонний напівпровідник використовується для створення

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

антивідбиттєвого покриття для сонячних батарей і р-п переходу з іншої сторони.

На рисунку 1.8 зображено, що розчин 12 М HF та 8 М HCl найкраще підходять для 15 – хвилинного травлення р-Si для отримання плівки з мікро- та нано- порами.

На представлений нижче таблиці 1.1 відображено параметри СЕ з поруватим кремнієм та без нього, товщиною 80 нм, виготовлених в розчині 12 М HF та 8 М HCl. [2]

Таблиця 1.1.

Параметри елементів

№	Structure	Jsc, mA/cm ²	Uoc, mV	FF	ККД, %
1.	In _x Sn _y O _z /SiO _x /nSi	37	510	0,57	12,5
2.	In _x Sn _y O _z / SiO _x /Psi/nSi	38	530	0,61	14,3
3.	SiO _x /Psi/nSi	40	515	0,63	14,6
4.	In _x Sn _y O _z /SiO _x /PSi/pSi	41	550	0,74	15,8
5.	SnO ₂ /PSi/pSi	35,3	587	76,6	16,2
6.	SnO ₂ :F/PSi/pSi	35,3	615	79,3	17,4
7.	SnO ₂ :Sb/PSi/pSi	35,7	602	77,1	16,9
8.	ZnO/PSi/pSi	26,2	499	67,5	13,9
9.	ZnO:Al/PSi/pSi	26,1	501	69,4	13,5

Підвищення ефективності сонячних елементів обумовлене використанням поверхневої поруватої плівки на Si. Це призводить і до збільшення параметрів цих СЕ, які наведені в таблиці 1.1.

1.3. Квантові точки

Квантова точка сонячної батареї (QDSC) є сонячним елементом, який використовує квантові точки в якості поглинаючого фотоелектричного матеріалу. Він намагається замінити сипучі матеріали, таких як кремній, мідь індію галію селеніду (CIGS) або телуриду кадмію (CdTe). Квантові точки мають заборонені зони, які перебудовуються в широкому діапазоні рівнів енергії, змінюючи їх розмір. В сипучих матеріалів, ширина забороненої зони фіксується шляхом вибору матеріалу. Ця властивість робить квантові точки привабливі для декількох площинних сонячних елементів, де різні матеріали використовуються для підвищення ефективності шляхом збору декількох частин сонячного спектра.

З 2016 року, ефективність перевищує 10%.

1.4. Сонячні концепції клітин

У звичайній сонячній батареї, світло поглинається в напівпровіднику, виробляючи електронно-дірковою парою; пара може бути пов'язана і згадується як екситон. Ця пара відділений від внутрішнього електрохімічного потенціалу (присутнього в р - п переходів або діодів Шоттки) і отриманий в результаті потік електронів і дірок створює електричний струм. Внутрішній електрохімічний потенціал створюється шляхом легування однієї частини напівпровідник з атомами, які діють як донори електронів (п-типу легування), а інший з акцепторами електронів (р-типу легування), що призводить до р - п - переходу. Генерація пари е - А вимагає, щоб фотони мають енергію, що перевищує ширину забороненої зони матеріалу. Ефективно, фотони з енергією нижче забороненої зони не поглинаються, в той час як ті, які вище, можна швидко (протягом приблизно 10-13 с) термалізувати до країв смуги,

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.	Піппис	Дата		22

зменшуючи вихід. Колишнє обмеження зменшує струм, в той час як термалізація зменшує напругу. В результаті, напівпровідникові клітини страждають компроміс між напругою і струмом (який може бути частково полегшені за рахунок використання декількох реалізацій переходу). Розрахунок балансу детальний показує, що ця ефективність не може перевищувати 33%, якщо використовувати один матеріал з ідеальною шириною забороненої зоною 1,34 еВ протягом сонячного елемента.

Ширина забороненої зони (1,34 еВ) ідеальна однієї сполучної осередок близька до кремнію (1,1 еВ), однією з багатьох причин, що кремній домінує на ринку. Проте, ефективність кремнієвих обмежується до приблизно 30% (граничної Шоклі-Queisser). Це можна поліпшити на одній розподільну осередку вертикально укладання клітин з різними забороненими зонами - називається «тандем» або «мульти-розподільним» підхід. Ж аналіз показує, що клітина два шари повинна мати один шар, налаштований на 1,64 еВ, а інший 0,94 еВ, що забезпечує теоретичну продуктивність на 44%. Осередок тришаровий повинна бути налаштована на 1,83, 1,16 і 0,71 еВ, з ефективністю 48%. «Нескінченність шар» клітина буде мати теоретичну ефективність 86%, з іншими термодинамічними механізмами втрат, що припадають на інше.

Традиційні способи приготування (кристалічний) кремній не піддаються такому підходу в зв'язку з відсутністю забороненої зони перебудови довжини хвилі. Тонкі плівки з-аморфного кремнію, які з - за потреби в розслаблених кристалі збереженні імпульсу можуть досягти прямих і заборонених зон перемішування вуглецю, може налаштувати ширина забороненої зони, а й інші питання, які перешкодили їх із зіставлення продуктивності традиційних клітин. Більшість тандем-клітинні структури засновані на більш високих напівпровідниках продуктивності, зокрема, арсеніду індію галію (InGaAs). Тришарові InGaAs / GaAs / InGaP клітина

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

(0,94 зони непропускання / 1.42 / 1.89 eV) тримають рекорд ККД 42,3% для експериментальних прикладів.

Проте, QDSCs страждають від слабого поглинання, а внесок поглинання світла при кімнатній температурі є незначним. Цю проблему можна вирішити шляхом використання multibranched nanostars Au.

Квантові точки напівпровідникові частинки, які були скорочені нижче розміру Ексітон радіуса Бора і з квантової механіки міркувань, енергії електронів, які можуть існувати всередині них стає кінцевим, так багато енергії в атомі. Квантові точки були названі як «штучні атоми». Ці рівні енергії перебудовувані шляхом зміни їх розміру, що, в свою чергу, визначає заборонені рівні. Ці точки можуть бути вирощені в діапазоні розмірів, що дозволяє їм висловлювати різні заборонені зони без зміни базового матеріалу або конструкції техніки. У типових вологих препаратах хімії, настройка здійснюється шляхом зміни тривалості синтезу або температури.

Можливість налаштувати зони роблять квантові точки бажані для сонячних елементів. Для отримання спектру розподілу фотонів Сонця, межа Шоклі-Queisser вказує на те, що максимальна ефективність перетворення сонячної відбувається в матеріалі з шириною забороненої зони 1,34 eV. Однак матеріали з більш низькими забороненими зонами будуть краще підходять для вироблення електроенергії з меншою енергією фотонів (і навпаки). Поодинокі реалізації відгалужувальних з використанням сульфідів свинцю (PbS) колоїдні квантові точки (CQD) мають заборонені зони, які можуть бути налаштовані в далекому інфрачервоному, частоти, які, як правило, важко досягти за допомогою традиційних сонячних батарей. Половина сонячної енергії, що досягає Землі в інфрачервоному діапазоні, в основному в ближній інфрачервоній області спектра. Квантова точка сонячні батареї роблять інфрачервону енергію, як доступна як будь-які інші.

Крім того, CQD пропонує легкий синтез і підготовку. У той час як суспендують в колоїдній рілкій формі, вони можуть бути легко оброблені

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ локум.	Пілпис	Дата		24

протягом виробництва, з fumehood як найбільш складного обладнання, необхідного. CQD зазвичай синтезує в невеликих партіях, але може бути масовим виробництвом. Точки можуть бути розподілені на підкладці шляхом нанесення покриття центрифугуванням, або вручну, або в автоматичному процесі. Великомасштабне виробництво може використовувати спрей-на або рулонного друку системи, що значно скорочує витрати на будівництво модуля.

Ранні приклади використовуються дорогі молекулярно - променевої епітаксії процесів. Проте, невідповідність решітки призводить до накопичення деформації і, таким чином генерації дефектів, обмеження кількості укладених шарів. Капелька методика зростання епітаксії показує свої переваги по виготовленню деформацій вільної КТ. В якості альтернативи, менш дорогі способи виготовлення пізніше були розроблені. Вони використовують вологу хімію (для CQD) і подальшу обробку розчину. Концентровані розчини наночастинок стабілізуються довгими вуглеводневими лігандами, які тримають нанокристали зважених в розчині.

Для того, щоб створити тверде тіло, ці рішення повалені і довгі стабілізуючі ліганди замінені короткі ланцюжки зшиваючими. Хімічно інженерна поверхню нанокристалічний краще пасивації нанокристалів і зменшити згубні стану пастки, які б обмеження продуктивності пристрою шляхом рекомбінації носіїв. Такий підхід дає ККД 7,0%.

Пізніше дослідження використовує різні ліганди для різних функцій шляхом настройки їх відносно вирівнювання смуги, щоб підвищити продуктивність до 8,6%. Клітини розчин оброблені на повітрі при кімнатній температурі і виставлені повітря-стабільність протягом більш ніж 150 днів без капсулювання.

У 2014 році застосування йодиду був введений в якості ліганда, який не зв'язується з киснем. Це підтримує стабільні n- і р-типу шарів, підвищуючи

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Апк
Змн.	Апк.	№ локум.	Пілпис	Дата		25

ефективність поглинання, який справив ефективність перетворення енергії до 8%. [1]

Висновки до розділу 1

Було проаналізовано існуючі сонячні батареї, які використовують сонячні елементи, що пройшли три етапи розвитку. Було виявлено, що підвищення ефективності сонячних елементів, а саме збільшення ККД при перетворення сонячної енергії в електричну залежить від технічного виконання, оптичних параметрів та кількістю економічних витрат. Недоліком монокристалів кремнію у сонячних елементах є невиправдано велика кількість високовартісного чистого кремнію, який потрібен для виготовлення пасивної підкладки.

З використанням полі- та мульти- кристалів є проблема з ступенем очистки. При виготовленні такі елементи є дешевшими, однак батареї на їх основі мають меншу ефективність порівняно з монокристалами. Тонкі плівки порівняно з монокремнієвими пластинами є перспективними у плані економічних витрат завдяки можливості автоматизації процесів виробництва (менша кількість матеріалів, режим низьких температур). ККД таких елементів у сьогоденні становить близько 10-13%.

Тому найбільш перспективними є нанотехнологічні сонячні елементи. Їх розробка вимагає низьких розмірів композитних структур.

У дослідженні і розробці використовувались низько-розмірні композитні структури засновані на тонких провідних оксидах і нанопоруватому кремнію. Їх оптичні та електронні властивості модифіковані. ККД таких структур становить 17,4%. А це є вирішальним фактором для покращення існуючих аналогів одночасно з невисокою вартістю.

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

2. Застосування тонких плівок з наночастинок кремнію для підвищення ефективності сонячних елементів

2.1. Підготовка зразків і методи вимірювання

В роботі досліджувались комерційні сонячні елементи з пластин кристалічного кремнію з орієнтацією (111). Концентрація донорів в емітері складала $N_D=5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, концентрація акцепторів в базовому шарі $N_A=5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Глибина p-n переходу складала $\sim 400 \text{ нм}$. Лицева поверхня не мала антивідбиттєвого текстуровання, але була покрита антивідбиттєвим шаром Ta_2O_5 .

Ефективність перетворення, виміряна з використанням імітатора сонячного випромінювання з АМ 1,5 і щільністю потужності 100 мВт/см^2 , складала 10-12% для початкових сонячних елементів. В процесі проведення експериментів антивідбиттєве покриття з лицевої поверхні зтравлювалось в водному розчині HF. Після такої процедури ефективність в перетворенні СЕ знаходилась в межах 9-11%. В подальшому для позначення подібних сонячних елементів буде використовуватись аббревіатура ЛСЕ (лабораторний сонячний елемент).

Для формування плівок nc-Si використовувались наночастинок двох типів: отримані в результаті піролізу силану, і наночастинок, синтезовані при диспропорціюванні SiO_x ($x \approx 1$). Середній діаметр наночастинок, отриманих при піролізу силану, складав 12 нм, їх зовнішня оболонка складалась з SiO_x ($0 \leq x \leq 2$), і ці наночастинок не знаходили фотолюмінесценції в видимій області спектра. Наночастинок кремнію, синтезовані в результаті диспропорціювання SiO_x , мали середній діаметр 2,5 нм ($0 \leq x \leq 2$), і їх оболонка в результаті гідросилування була покрита молекулами октадецена. Даний сорт наночастинок володів яскравою фотолюмінесценцією в червоній області

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Піппис	Дата		27

спектру з квантовим виходом 7-11%. Типовий спектр фотолюмінесценції цих наночастинок показаний на рис. 2.1

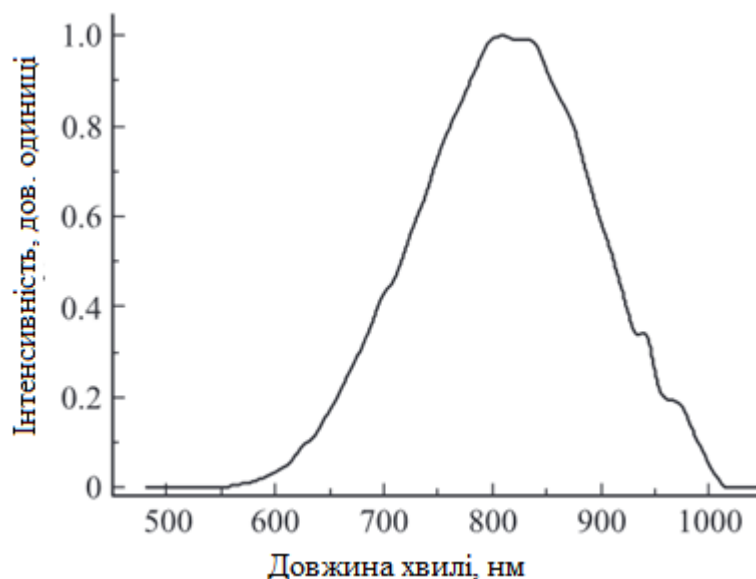


Рис. 2.1. – Спектр фотолюмінесценції наночастинок кремнію PLnc-Si, збуджуваний випромінюванням з довжиною хвилі 405 нм.

В подальшому наночастинок, отримані при піролізі силану, будуть маркуватись nc-Si, а наночастинок, синтезовані в результаті диспропорціювання SiO_x , PLnc-Si.

Плівки з наночастинок наносились на лицеву поверхню СЕ способом накопичення фіксованого об'єму золі nc-Si спирті PLnc-Si в гексані і висушуванні на повітрі. Товщина плівок варіювалась ступенево, повторним накопиченням золі після висихання попереднього, і вимірювалась степ-профілометром.

В якості світлового джерела для вимірювання ефективності перетворення використовувалась галогенова лампа, спектр випромінювання якої показаний на рис. 2.2. На цьому ж рисунку приведений спектр випромінювання абсолютно чорного тіла, скоректований на спектральну залежність коефіцієнту чорноти вольфраму, - матеріалу, з якого виготовлена нитка розжарювання галогенової лампи. Зі співставлення цих залежностей слідує, що спектр випромінювання лампи близький до спектру

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

випромінювання лампи в площині знаходження лицевої поверхні СЕ складала 300 мВт/см^2 . Для підтримання постійної температури на поверхні СЕ під час вимірювання ця поверхня обдувалась потужним вентилятором, температура контролювалась завдяки припаяному до СЕ термоопору Pt 1000 і складала 30°C . Без вентилятора температура СЕ перевищувала 90°C .

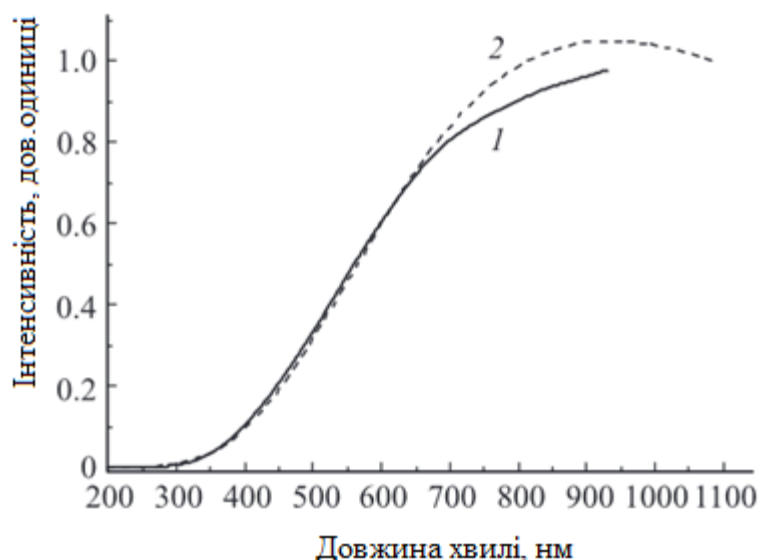


Рис. 2.2. – 1 - спектр випромінювання галогенової лампи; 2 – спектр пропускання абсолютно чорного тіла з температурою 3000 К, скоректований на спектральну залежність коефіцієнтів чорноти вольфраму.

В експериментах також вимірювались спектральний відгук і квантова ефективність СЕ. Для цих вимірювань використовувався набір світлодіодів, максимумам випромінювання яких відповідали довжини хвиль 463, 520, 632 і 905 нм відповідно. Щільність потужності світлодіодів в площині розташування досліджуваного СЕ складала 1 мВт/см^2 . Площа лицевої поверхні всіх СЕ знаходилась в межах $4\text{-}4,5 \text{ см}^2$.

Для обчислення внутрішньої квантової ефективності (ВКЕ) вимірювались також спектри відбивання світла від чистої лицевої поверхні СЕ і від поверхні, покритої досліджуваними плівками nc-Si і PLnc-Si. Спектри відбивання реєструвались з допомогою спектрофотометра AvaSpec-2048 (Avantes). Крім того, вимірювалася інтегральна по спектру потужність

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк.
Змн.	Анк.	№ локум.	Пілпис	Дата		29

світла, відбитого від лицьової поверхні досліджуваного СЕ. В якості детектора відбитого світла в цій схемі служив СЕ з чистою лицьовою поверхнею, який розташовувався паралельно досліджуваного СЕ і який попередньо калібрований по потужності, відбитої від покриття з коефіцієнтом відображення 95 % і від полірованої поверхні монокристалічного кремнію.

Проходження світла через плівки nc-Si і PLnc-Si, нанесені на лицьову поверхню СЕ, моделювався за допомогою вимірювання спектрів пропускання через аналогічні плівки, але нанесені на тонкі покривні скла фірми "Bio Vitrum" товщиною 130 мкм. Для реєстрації вольтамперних характеристик використовувалися цифровий вольтметр Експерт 001 (Еко-нікс) і цифровий осцилограф PCSU1000 (Velleman). Швидкість зміни вхідної напруги при реєстрації вольтамперних характеристик становила 10 мВ/с. Зміна величини вхідної напруги виконувалась вручну, а також за допомогою електронної схеми імітатора навантаження, зібраної на основі польового транзистора і генератора пилоподібної напруги. В останньому варіанті вимірювалися напруга і струм, вироблені СЕ на змінному навантаженні, зовнішня напруга не підводилася.

Як еталони порівняння використовувалися комерційні СЕ з пірамідально текстурованою лицьовою поверхнею і з р-п переходом глибиною 200 нм, сформованим на цій поверхні. Лицьова поверхня цих сонячних елементів мала покриття, що просвітлює з нітриду кремнію. Ефективність перетворення цих СЕ, виміряна на імітаторі сонячного випромінювання з АМ 1.5 і щільністю потужності 100 мВт/см², склала ~17%. Надалі ці сонячні елементи будуть маркуватись КСЕ (контрольні сонячні елементи). [3]

2.2. Результати вимірювань

2.2.1. Інтегральна по спектру ефективність сонячних елементів

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ локум.	Піппис	Дата		30

Вольт-амперні характеристики, виміряні для ЛСЕ, освітлених галогеновою лампою, показані на рис. 2.3. (залежності 1, 2, 3). На рис. 2.3 також наведені значення потужності, що виділяється в навантаженні цим же ЛСЕ, в залежності від напруги на ЛСЕ (криві 1', 2' і 3'). Криві 1 і 1' отримані для ЛСЕ з чистою лицьовою поверхнею, криві 2, 3 і 2', 3' - для ЛСЕ, поверхня якого вкрита одним і двома шарами плівки PLnc-Si. Товщина кожного шару становила 200 нм. З зіставлення залежностей 1, 2, 3 і 1', 2', 3' випливає, що при нанесенні плівок PLnc-Si як струм короткого замикання, так і потужність, що виділяється збільшуються. Однак при нанесенні третього шару такої ж товщини, коли сумарна товщина покриття виявляється рівною ~600 нм, обидва ці параметра виявляються меншими за попередні.

Залежність величини виділеної потужності і ефективності перетворення ЛСЕ, відповідні рис. 11, показані на рис. 2.4 (криві 1 і 1'). З цього малюнка видно, що ефективність перетворення ЛСЕ при нанесенні перших двох шарів зростає з 9.6 до 11.2%, а при нанесенні третього зменшується до 11%. Аналогічна поведінка для плівки nc-Si (криві 2 і 2') при їх нанесенні на поверхню ЛСЕ.

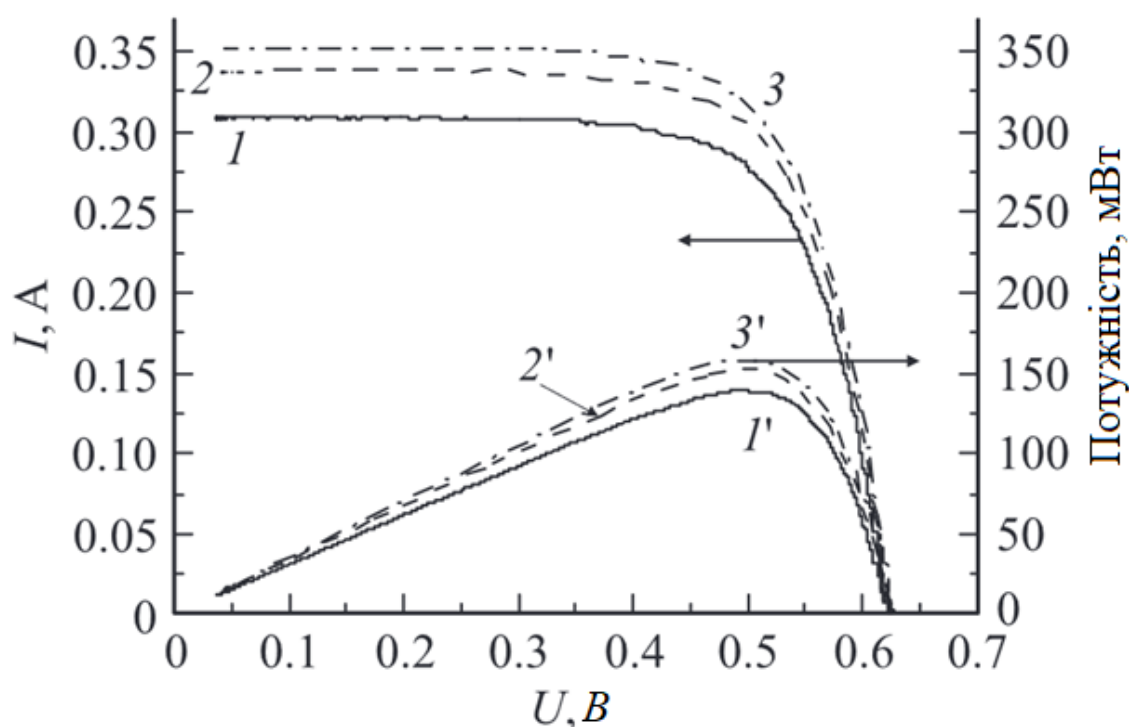


Рис. 2.3. – Залежності від напруги струму (1,2,3) і потужності, що виділяється ЛСЕ (1', 2' і 3') при його освітленні галогеновою лампою з параметрами, вказаними в тексті. 1, 1' – ЛСЕ з чистою лицевою поверхнею; 2, 2' – з поверхнею покритою плівкою PLnc-Si товщиною 200 нм; 3, 3' – лицева поверхня ЛСЕ, покрита двома шарами плівки PLnc-Si товщиною 200 нм кожен.

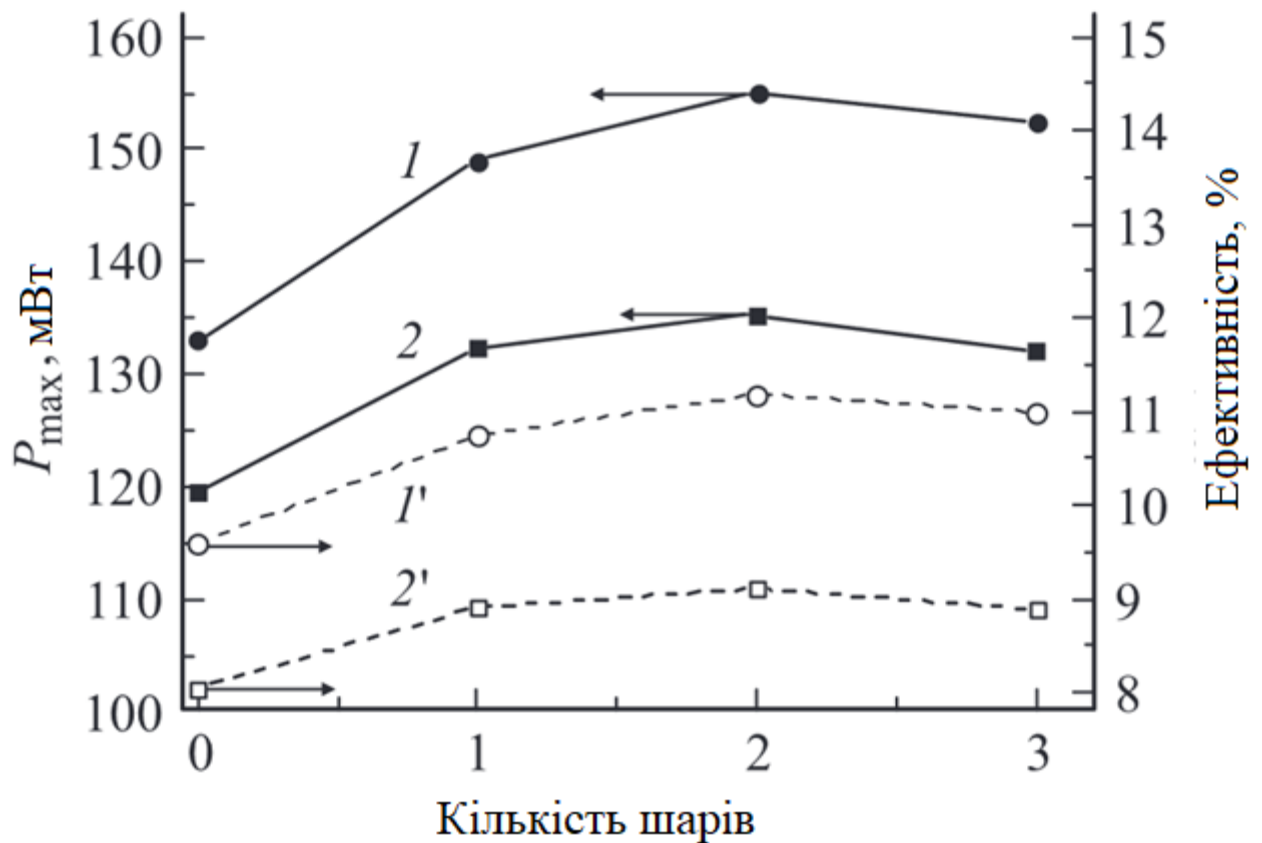


Рис. 2.4. – Залежності потужності, що виділяється ЛСЕ (1,2) і його ефективності (1', 2') від числа шарів товщиною 200 нм кожен, утворених плівкою PLnc-Si на його лицевій поверхні.

2.3. Спектральний відгук сонячних елементів

2.3.1. Темнові вольт-амперні характеристики.

Як добре відомо, темнові вольт-амперні характеристики дозволяють отримати корисну інформацію про параметри р-п переходу і про властивості поверхні пластини кристалічного кремнію, в якій цей перехід сформований. Наприклад, функціональна залежність прямого і зворотного струмів через р-п

перехід СЕ дозволяє встановити наявність домішкових станів в області переходу і наявність центрів рекомбінації на лицьовій поверхні СЕ.

Темнові вольт-амперні характеристики ЛСЕ з чистою лицьовою поверхнею і з поверхнею, покритою одним шаром плівки nc-Si, а також з комбінованим покриттям, що складається з плівки nc-Si (нижній шар) і плівки PLnc-Si (верхній шар), показані на рис. 2.5. З аналізу залежностей, наведених на рисунку, випливає, що нанесення плівок з наночасток кремнію на лицьову поверхню СЕ найбільш істотно позначається на поведінці зворотних струмів через р-n перехід, від функціональної залежності прямих струмів при нанесенні плівок змінюється незначно. З рис. 13 видно, що величина зворотного струму істотно зменшується щодо первинних значень (крива 1) при послідовному нанесенні плівки nc-Si (крива 2) і потім плівки PLnc-Si (крива 3). З зіставлення залежностей 3 і 4 видно, що величини зворотного струму для ЛСЕ, покритого комбінованою плівкою nc-Si-PLnc-Si виявляються помітно меншими, ніж аналогічні величини для КСЕ (крива 4). Аналіз даних залежностей буде проведено пізніше.

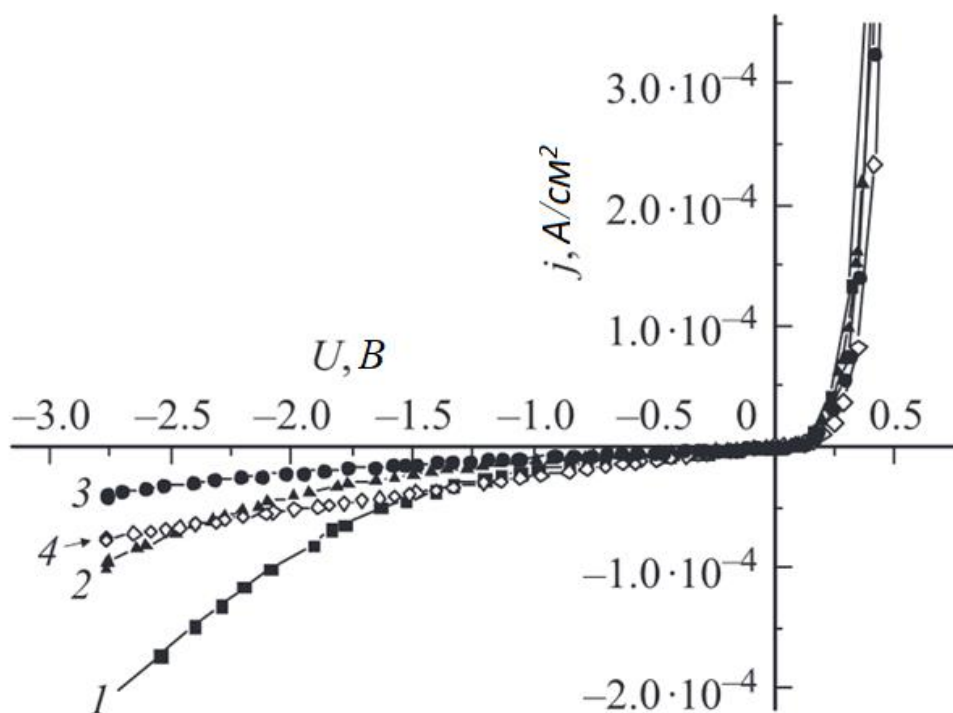


Рис. 2.5. – Темнові вольт-амперні характеристики ЛСЕ: 1 – з чистою лицьовою поверхнею; 2 – з поверхнею, покритою плівкою nc-Si товщиною 200 нм; 3 – лицева поверхня покрита

ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ					Апк
Змн.	Апк.	№ локум.	Пілпис	Дата	33

двошаровою комбінованою плівкою nc-Si-PLnc-Si з сумарною товщиною 400 нм; 4 – КСЕ з чистою лицевою поверхнею.

2.3.2 Оптичні характеристики лицевої поверхні СЕ.

Оскільки світло, відбите від лицевої поверхні СЕ, зменшує його ефективність, одним з основних завдань шару, що наноситься на цю поверхню, є зменшення такого відображення. На рис. 2.6., а наведені спектри нормального відображення від чистої поверхні ЛСЕ (крива 2), а також від цієї ж поверхні, покритої плівкою nc-Si (крива 3) і комбінацією плівок nc-Si внутрішній шар) і PLnc-Si (зовнішній шар) (крива 4). На цьому ж малюнку наведені зареєстровані спектри відбиття від полірованої поверхні c-Si (р-тип провідності, крива 1) і від поверхні вискоефективного комерційного КСЕ з текстурованою лицевою поверхнею і антивідбиттєвим покриттям з нітриду кремнію (крива 5).

З виду наведених спектрів випливає, що відображення від чистої поверхні досліджуваного ЛСЕ дуже близько до відбиття монокристалічного кремнію і зменшується до величин $\sim 10\%$ при нанесенні на лицеву поверхню ЛСЕ плівки nc-Si. Ще менша відбиття $\sim 4\%$ досягається для комбінованого покриття з плівок nc-Si і PLnc-Si, при чому для фотонів коротко хвильовий області спектра воно зменшується майже до 2% . Порівнюючи відображення від комбінованого покриття з відбиттям від КСЕ, можна стверджувати, що навіть при відсутності текстурування поверхні дослідженого ЛСЕ дане покриття дуже ефективно знижує втрати енергії на відображення світла.

Оскільки крім втрат на відбиття повинні враховуватися також втрати на поглинання світла при його проходженні через покриття, було змодельовано такі втрати, вивчивши проходження світла через плівки з наночастинок кремнію, нанесених на тонкі (130 мкм) покривні скла фірми "BioVitrum". Товщина плівок була приблизно така ж, як і у плівок, що наносяться на лицеву поверхню ЛСЕ. Спектри пропускання таких плівок показані на рис.2.6, б. З наведених спектрів видно, що пропускання плівки

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

nc-Si в усьому діапазоні дослідженого спектра перевищує 65%. Пропускання плівки PLnc-Si в області довжин хвиль 350-450 нм знаходиться в межах 35-60%, в той час як в діапазоні довжин хвиль, великих 600 нм, воно складає ~95%. [3]

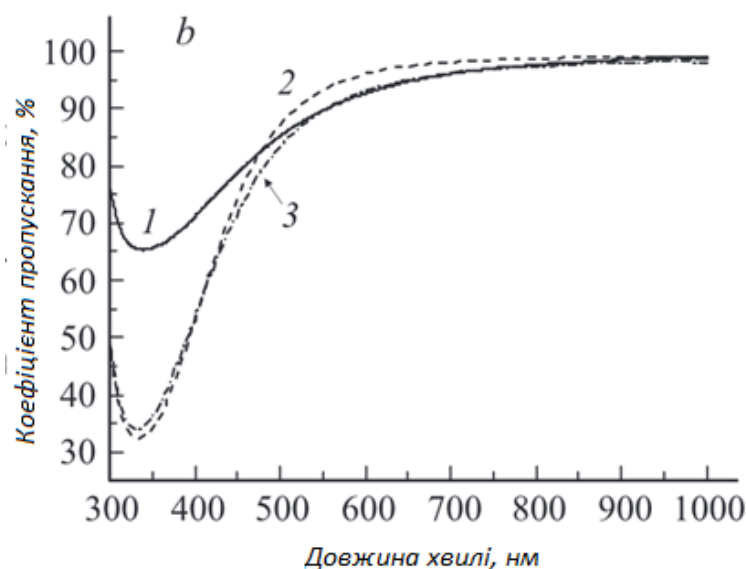
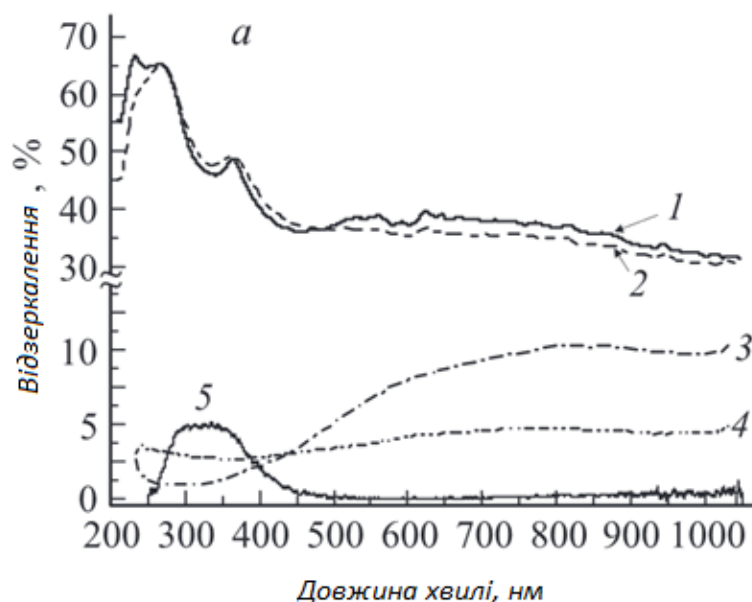


Рис. 2.6. – *a* спектри відображення: 1 - спектр відображення від поверхні полірованої плстини монокристалічного кремнію, легованого бором; 2 – чиста лицева поверхня; 3 – поверхня покрита плівкою nc-Si товщиною 200 нм; 4 – лицева поверхня покрита двошаровою комбінованою плівкою nc-Si/PLnc-Si з сумарною товщиною 400 нм; 5 – спектр відображення від чистої лицевої поверхні КСЕ. *b* – спектри пропускання плівок нанокристалічного кремнію, нанесених на покривне скло: 1 – плівка nc-Si товщиною 200

нм; 2 – плівка PLnc-Si, товщиною 200 нм; 3 – двошарова комбінована плівка nc-Si/PLnc-Si з сумарною товщиною 400 нм.

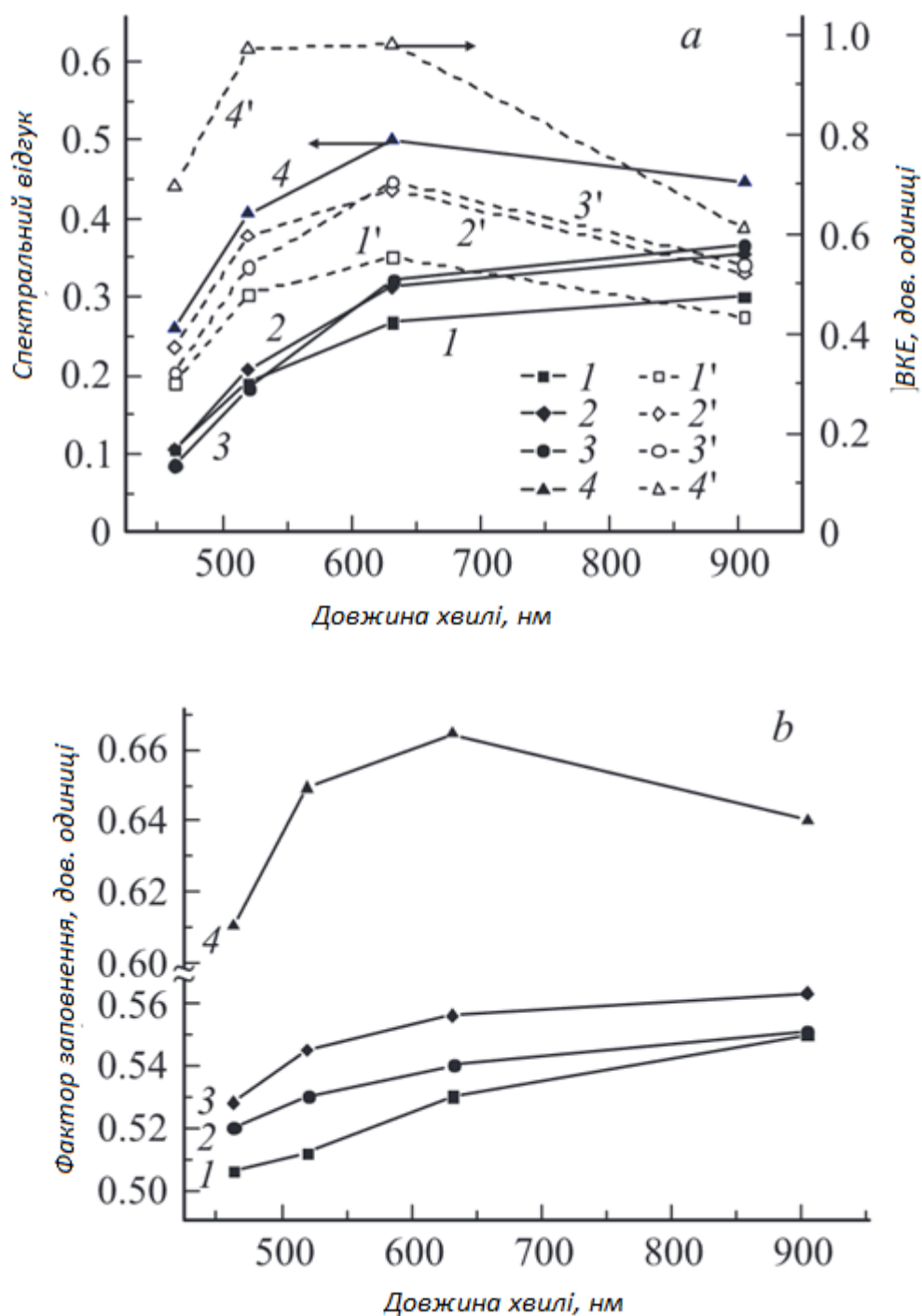


Рис. 2.7. – *a* – спектральний відгук (1,2,3) і внутрішня квантова ефективність (1', 2', 3') ЛСЕ: 1, 1' – чиста лицева поверхня; поверхня, покрита: 2, 2' – плівкою nc-Si товщиною 200 нм; 3, 3' – комбінованою плівкою nc-Si/PLnc-Si з сумарною товщиною 400 нм; 4, 4' – ЕСЕ з чистою лицевою поверхнею. *b* – спектральна залежність фактора заповнення ЛСЕ (1, 2, 3) і КСЕ (4), параметри лицевих поверхонь СЕ такі ж, як в пункті *a*.

2.3.3. Квантова ефективність ЛСЕ.

Вольт-амперні характеристики освітлюваного ЛСЕ вимірювалися на рівні малого світлового сигналу для того, щоб уникнути збуджень р-п - переходу, пов'язаних з його перегрівом і з надмірною інжекцією носіїв. Як джерела світла служили світлодіоди, що випромінюють в смугах поблизу довжин хвиль 463, 520, 632 і 905 нм відповідно. Щільність потужності всіх використаних світлодіодів підбиралася однаковою і становила в площині розташування досліджуваного ЛСЕ 1.0 мВт/см².

З вольтамперних характеристик визначалися струм короткого замикання (I_{sc}) і напруга розімкнутого контуру (U_{oc}) освітлюваного ЛСЕ, а також обчислювалася потужність, що поглинається і виділяється цим елементом.

Для кожної довжини хвилі освітлюючого випромінювання визначалися спектральний відгук ($SR(\lambda)$) і внутрішня квантова ефективність ($IQE(\lambda)$). Спектральний відгук обчислювався з співвідношення

$$CB(\lambda) = I_{sc}/S\sigma(\lambda),$$

де I_{sc} - струм короткого замикання, S - площа лицевої поверхні ЛСЕ і $\sigma(\lambda)$ - щільність потужності світлового випромінювання, що падає на цю поверхню.

Внутрішня квантова ефективність обчислювалася за допомогою наступного виразу:

$$BKE(\lambda) = \frac{I_{sc}hc}{eS\sigma(\lambda)(1-R)T\lambda}$$

де e - елементарний заряд, R - вимірний коефіцієнт відображення і T - пропускання плівок з наночасток кремнію, визначене з модельних експериментів, описаних вище.

Також з вольт-амперних характеристик визначався фактор заповнення

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ локум.	Пілпис	Дата		37

$$FF(\lambda) = \frac{I_{sc} U_{oc}}{P_{max} \lambda}$$

де $P_{max}\lambda$ - максимальна потужність, що виділяється ЛСЕ при висвітленні його світлом з довжиною хвилі λ .

Спектральна залежність $SR(\lambda)$ (криві 1-4) і $IQE(\lambda)$ (криві 1'-4') показана на рис. 2.7, а, залежність $FF(\lambda)$ на рис. 2.7, б, причому залежно 4 і 4' виміряні для ЕСЕ. З рис. 2.6., а видно, що і спектральний відгук, і внутрішня квантова ефективність збільшуються при нанесенні плівок з наночасток кремнію на лицьову поверхню СЕ, при цьому найбільше збільшення $SR(\lambda)$ і $IQE(\lambda)$ досягається в діапазоні довжин хвиль ≥ 630 нм. Порівняння $SR(\lambda)$ і $IQE(\lambda)$ ЛСЕ з аналогічними величинами КСЕ показує, що в ближній ІЧ області ($\lambda \approx 905$ нм) вони мало відрізняються. Фактор заповнення також зростає при нанесенні плівок з наночасток кремнію, при цьому найбільше збільшення $FF(\lambda)$ досягається в короткохвильовій області вивченого спектра. [5]

2.4. Аналіз вмісту дефектів в досліджуваних сонячних елементах

Для з'ясування причин, що призводять до збільшення ефективності перетворення ЛСЕ при нанесенні плівок з наночасток кремнію, було проаналізовано динаміку зміни темнових вольт-амперних характеристик ЛСЕ в залежності від виду покриття їх лицьової поверхні. Найбільші зміни при зазначеній процедурі спостерігаються для зворотних струмів через р-п перехід ЛСЕ. Величини і функціональні залежності прямих темнових струмів через р-п-переход при нанесенні плівок практично не змінюються.

В першу чергу була перевірена можливість апроксимації експериментальних залежностей законом Шоклі, яким описуються електричні параметри ідеального р-п-переходу в напівпровіднику. Однак ні

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Апк
Змн.	Апк.	№ локум.	Пілпис	Дата		38

для одного з вивчених СЕ, включаючи контрольний, не вдалося підібрати потрібних

параметрів, відповідних закономірності Шоклі. На рис. 2.8. показані залежності прямих (а, b) і зворотних (с) струмів від напруги на р-п-переході. На цьому ж малюнку наведені апроксимації експериментальних графіків (пунктирні і штрихові лінії). При апроксимації прямих струмів враховувалися струми рекомбінації в р-п - переході (перший доданок у формулі (1)) і струми інжекції (другий доданок в цій же формулі), а також падіння напруги на р-п-переході (U_0), яке виявляється істотним при високому рівні інжекції носіїв струму:

$$I = I_{sc1} \left(e^{\frac{eU}{n_1 kT}} - 1 \right) + I_{sc2} \left(e^{\frac{e(U-U_0)}{n_2 kT}} - 1 \right) + I_{sc3} \quad (1)$$

Крім того, в апроксимаційні співвідношення були включені складові, які не залежать від прикладеної напруги (I_{sc3}), які пов'язано з поверхневими крайовими струмами витоку. У формулі (1) величина e - елементарний заряд, k - постійна Больцмана і T - абсолютна температура ЛСЕ, яка в експериментах підтримувалася поблизу величини 297 К. Величини n_1 і n_2 в наведеній формулі - коефіцієнти неідеальності, які, також як I_{sc1} , I_{sc2} і I_{sc3} , є підгінним параметрами.

Параметри апроксимації наведені в таблиці 2.1 для ЛСЕ з чистою лицьовою поверхнею (верхній рядок), з поверхнею, на яку нанесена комбінована плівка товщиною 200 нм з наночастинок nc-Si і PLnc-Si (середня рядок), а також для КСЕ з чистою лицьовою поверхнею.

Наявність першого доданка в апроксимаційних залежностях вказує на те, що в кремнієвих пластинах обох СЕ в межах р-п - переходу присутня деяка кількість дефектів, які служать центрами рекомбінації при протіканні струму через цей перехід. Параметр неідеальної ЛСЕ n_1 незначно зменшується при нанесенні комбінованої плівки nc-Si і PLnc-Si і дещо менше, ніж у КСЕ. Подібне співвідношення параметрів неідеальної вказує на

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

те, що нанесення плівки слабо впливає на концентрацію дефектів в області р-п-переходу СЕ. Також можна стверджувати, що концентрація дефектів в ЛСЕ трохи нижче, ніж в КСЕ.

Параметри неідеальності n_2 , наведені в таблиці, для покритого ЛСЕ і КСЕ близькі, в той час як щільність струму j_{sc2} , що визначається термогенерацією неосновних носіїв в р- і п-областях СЕ, приблизно в 2 рази вище, ніж для контрольного зразка. Для вихідного ЛСЕ параметри n_2 і j_{sc2} істотно менше, що може бути пов'язано з забрудненням ЛСЕ неконтрольованими домішками в нанокремнії.

Величина j_{sc3} ЛСЕ з покриттям з комбінованою плівки nc-Si і PLnc-Si становить $8 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$, що на порядок менше, ніж аналогічна величина в КСЕ. Лицьова поверхня КСЕ покрита нітридом кремнію, який, по-перше, пасивує поверхневі дефекти і, по-друге, істотно зменшує поверхневі струми витоку. Тому співвідношення $j_{sc3\text{ЛСЕ}}/j_{sc3\text{КСЕ}}$ вказує на хороші перспективи застосування плівок з наночасток кремнію в якості покриттів, зменшую-щих поверхневі і крайові струми витоку.

Аналіз зворотних струмів через р-п-перехід СЕ показав, що насичення струму, як пророкує модель Шоклі, не досягається у всьому діапазоні напруг, використаних в експериментах, і величина зворотного струму монотонно зростає зі збільшенням прикладеної зворотної напруги. Разом з тим експериментальні залежності струму неможливо апроксимувати ступеневою функцією виду $I_{rev} \propto U_n$, де $n = 1/2$ або $1/3$ в залежності від форми профілю р-п-переходу. Оскільки подібна залежність визначається генерацією носіїв в р-п-переході, необхідно допустити, що існує інший, більш ефективний механізм перенесення зарядів в досліджених СЕ. В процесі пошуку підгінних функцій було виявлено, що найкращий збіг з експериментальними кривими дає залежність виду

$$j_{rev} = \frac{j_m}{U_m} U_{rev} e^{\left(1 + \frac{U_{rev}}{U_m}\right)} \quad (2)$$

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Ця залежність характерна для тунелювання зарядів під бар'єром, створеним р-п-переходом між двома виродженими областями р- і п- типу, при чому U_m - це таке напруження, при якому досягається екстремум щільності струму j_m . Тут необхідно зазначити, що для більш зручного графічного представлення зворотна напруга U_{rev} , так само як і зворотні струми j_{rev} на рис. 2.8, с, відрізняються знаком від прямих напруг і струмів на рис. 2.8, а і 2.8, б ($U_{rev} = -U$, $j_{rev} = -j$). [5]

Таблиця 2.1

Вміст дефектів в сонячних елементах

		n_1	n_2	$j_{sc1}, A/cm^2$	$j_{sc2}, A/cm^2$	$j_{sc3}, A/cm^2$	U_0, B	$ j_m , A/cm^2$	$ U_m , B$
ЛСЕ	чистий	2,8	1,09	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	0,2	$4,9 \cdot 10^{-6}$	1,37
	покритий	2,7	1,3	$7,9 \cdot 10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-8}$	0,2	$1 \cdot 10^{-5}$	4
КСЕ		3,0	1,36	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	0,2	$8,8 \cdot 10^{-5}$	11,1

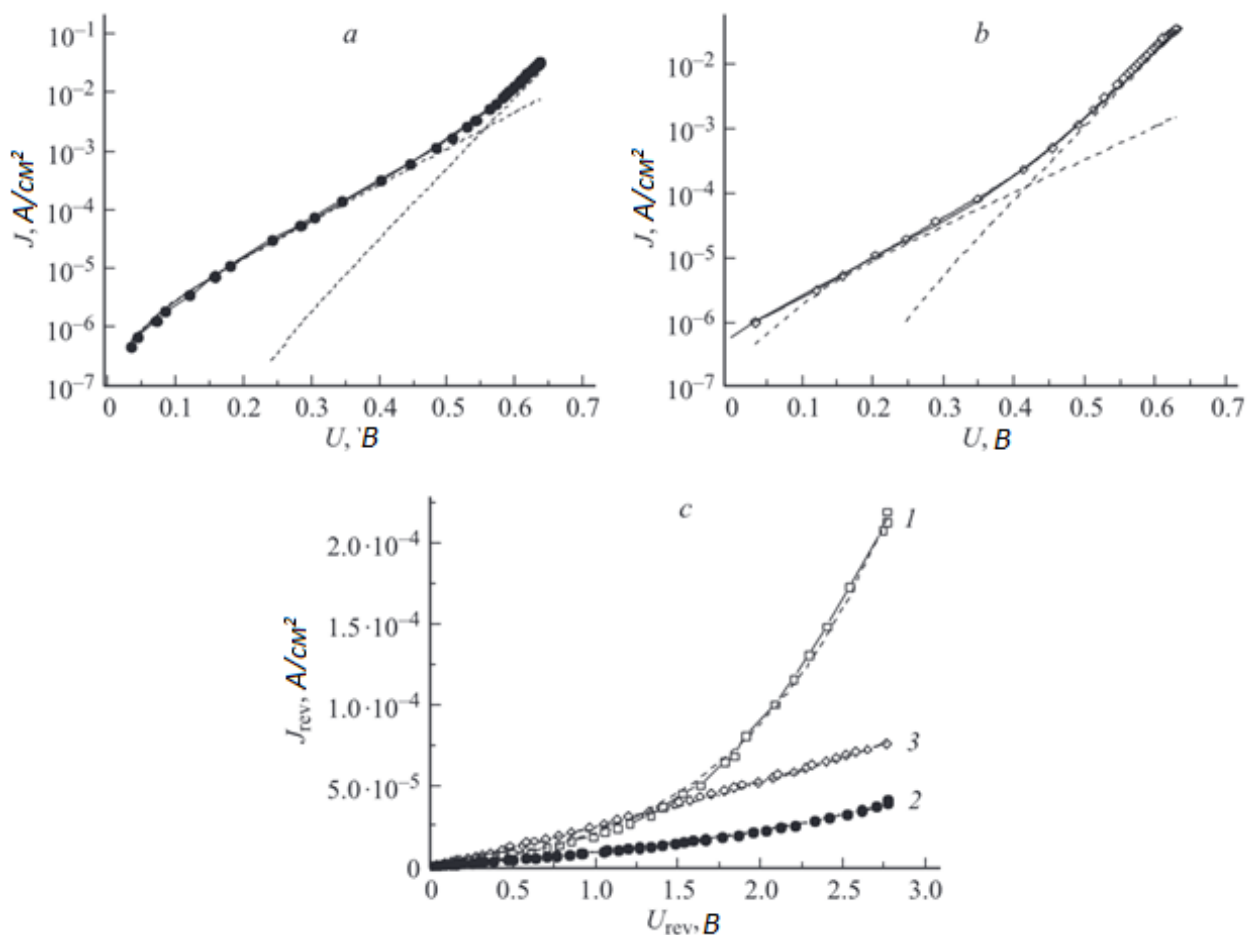


Рис. 2.8. – Прямі темнові струми: а - ЛСЕ з лицьовою поверхнею, покритою комбінованої плівкою nc-Si / PLnc-Si; б - КЕСЧ чистої лицьової поверхнею; в- зворотні темнові струми. 1- ЛСЕ з чистою лицьовою поверхнею; 2 ЛСЕ з лицьовою поверхнею, покритою комбінованою плівкою nc- Si / PLnc-Si; 3 КЕСЧ з чистою лицьовою поверхнею. Пунктирними лініями показані чисельні апроксимації відповідних експериментальних функцій.

Висновки до розділу 2

Досліджено збільшення ефективності СЕ на основі монокристалічного кремнію при нанесенні на його лицьову поверхню тонких плівок з наночасток кремнію. У дослідженнях застосовувалися наночастинки із середнім діаметром 12 нм, зовнішня оболонка яких представляла SiO_x ($0 \leq x \leq 2$), і наночастинки діаметром 2.5 нм, вкриті октадеценом, здатні до фотолюмінесценції в червоній області спектра. Виявлено, що ефективність перетворення СЕ зростає до 12% відносно початкової величини при збільшенні товщини плівки до 400 нм, при нанесенні більш товстих плівок ефективність перетворення зменшується. Аналогічна залежність спостерігається для струму короткого замикання СЕ, який збільшується на 15% при нанесенні таких плівок. Величина напруги холостого ходу практично не залежить від наявності плівок nc-Si на лицьовій поверхні СЕ.

З аналізу спектрів відбиття світла від лицьової поверхні СЕ і спектрів пропускання плівок nc-Si, а також вольт-амперних характеристик, виміряних при висвітленні СЕ слабкими світловими монохроматичними джерелами, отримані спектральні залежності внутрішньої квантової ефективності і фактора заповнення. Показано, що найбільше збільшення IQE при нанесенні плівок досягається в діапазоні довжин хвиль $\lambda \geq 600$ нм. Відсутність збільшення IQE в короткохвильовій області спектра при нанесенні плівок PLnc-Si свідчить про те, що вплив перетворення короткохвильової компоненти падаючого світла в довго хвильову не грає помітної ролі в збільшенні ефективності СЕ.

З аналізу темнових вольт-амперних характеристик СЕ встановлено, що в забороненій зоні кремнію в області р-п-переходу СЕ присутні рівні, які працюють як центри рекомбінації. Нанесення плівок nc-Si і PLnc-Si на лицьову поверхню СЕ практично не впливає на струми рекомбінації, пов'язані з цими центрами, проте помітно збільшує струми, пов'язані з теплової

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Апк
Змн.	Апк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

інжекцією носіїв.

Основний вплив плівки nc-Si і PLnc-Si надають на зворотні темнові струми через p-n - перехід СЕ, значно зменшуючи їх величину. Характер залежності струмів від зворотного напруги вказує, що вони визначаються тунелюванням носіїв через p-n - перехід. Концентрація електронних рівнів енергії в забороненій зоні, через які відбувається тунелювання, зменшується при нанесенні плівок nc-Si і PLnc-Si на лицьову поверхню СЕ. Найбільш ймовірними джерелами подібних рівнів є Рb і E'-центри. Пасивація цих центрів здійснюється атомами водню, які знаходяться на поверхні наночастинок кремнію, що беруть участь у формуванні плівок.

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Апк
Змн.	Апк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

3. Контроль оптичної ефективності сонячної батареї

3.1 Розрахунок енергії сонячного випромінювання, яка може бути перетворена сонячною батареєю в електричну

Інтенсивність сонячного випромінювання, яке падає на дах будинку, складається з інтенсивності прямого випромінювання I_{Bt} та інтенсивності розсіяного випромінювання I_{Dt} , які можна подати формулами

$$I_{Bt} = \frac{\cos \theta}{\cos \Phi} I_B$$

та

$$I_{Dt} = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) I_D.$$

Тут I_B та I_D – інтенсивності прямого та розсіяного випромінювання, яке падає на горизонтальну поверхню; θ – кут падіння сонячного випромінювання, який дорівнює куту між напрямком падіння випромінювання та нормаллю до поверхні; Φ – зенітний кут; β – кут нахилу даху. Зазначені параметри можна знайти за наступними формулами:

$$\cos \theta = \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \cos(z - z_s),$$

де α – висота сонця; z – сонячний азимутальний кут; z_s – азимут проекції нормалі до поверхні даху на горизонтальну площадку; якщо дах орієнтований на південь, то $z_s = 0$;

$$\cos z = \frac{\cos \delta \sin L \cos h - \sin \delta \cos L}{\sin \Phi},$$

де кут схилення (кут між напрямком на Сонце і екваторіальною площиною, вимірюваний в градусах за формулою Купера)

$$\delta = \delta_0 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right],$$

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ док-м.	Підпис	Дата		45

$\delta_0 = +23,5^\circ$ в період літнього сонцестояння та $\delta_0 = -23,5^\circ$ в період зимового сонцестояння; N – порядковий номер дня (наприклад, для 2 лютого – $N = 33$); L – широта (для Києва $L = 50,45^\circ$); h – часовий кут (в градусах),

$$h = 15(TST - 12),$$

де TST – справжній сонячний час.

Нехтуючи внеском, який дає випромінювання, відбите на дах від поверхні Землі, повну інтенсивність сонячного випромінювання на поверхні даху можна подати як

$$I_t = I_{Bt} + I_{Dt}.$$

За наведеними формулами у програмі MATLAB було розраховано надходження енергії сонячного випромінювання на 1 м^2 даху з кутом нахилу 70° для кожного дня року (лістинг програми у Додатку А). За цими даними була побудована табл. 3.1

Для подальших розрахунків потрібно знати значення енергії сонячного випромінювання для кожного дня протягом року. Для цього інтерполюємо дані табл. 3.1 для отримання 365 точок та побудуємо графік за допомогою програми MATLAB. Лістинг програми наведений у Додатку Б.

На основі отриманих даних побудовано графік залежності сонячної енергії, яка падає на 1 м^2 даху з кутом нахилу 70° на широті Києва, від номеру дня (рис. 3.1).

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Апк
Змн.	Апк.	№ локум.	Пілпис	Дата		46

Таблиця 3.1

Повна енергія сонячного випромінювання,
яка падає на 1 м² даху з кутом нахилу 70° на широті Києва

Місяць	Інтенсивність сонячної радіації за добу	Інтенсивність сонячної радіації за місяць
Січень	1,209	37,479
Лютий	1,993	55,804
Березень	3,139	97,309
Квітень	3,343	100,29
Травень	3,451	106,981
Червень	3,527	105,81
Липень	3,397	105,307
Серпень	3,461	107,291
Вересень	3,38	101,4
Жовтень	2,28	70,68
Листопад	1,005	30,15
Грудень	0,734	22,754

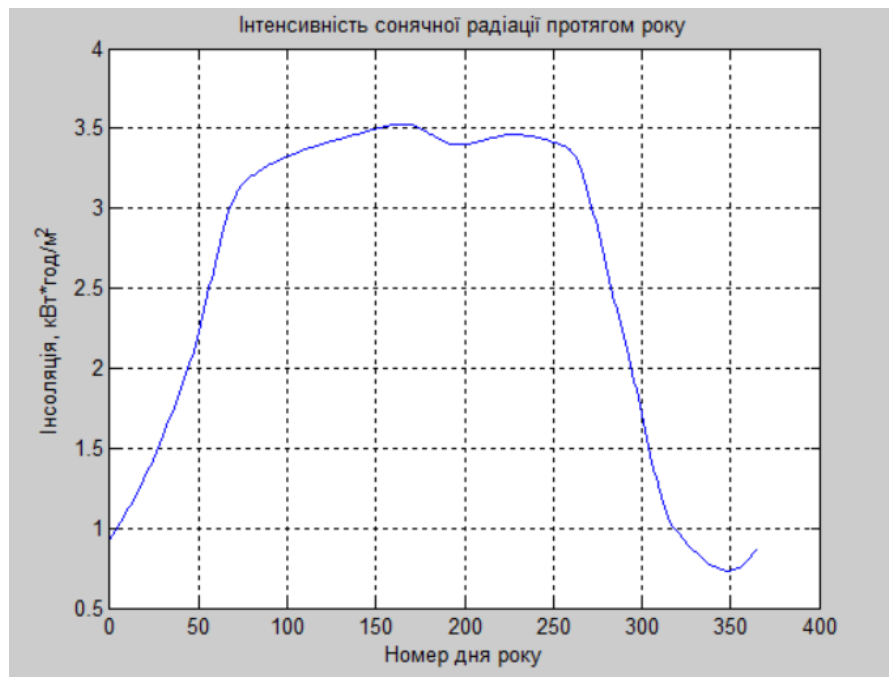


Рис. 3.1 Залежність сонячної енергії, яка падає на 1 м² даху з кутом нахилу 70° на широті Києва, від номеру дня

3.2 Структурна схема системи вимірювання прямого та розсіяного сонячного випромінювання

На протязі дня змінюються абсолютні значення інтенсивностей прямого та розсіяного сонячного випромінювання, а також їх відношення. Усереднені дані про такі зміни важливі для прогнозування можливого надходження електричної енергії, виробленої сонячною батареєю, у різні пори року, різні місяці і навіть години дня. Для цього потрібно налагодити процес автоматичного вимірювання інтенсивностей прямого та розсіяного сонячного випромінювання через невеликі проміжки часу і отримані дані накопичувати для подальшого статистичного оброблення.

На рис. 3.2 зображена структурна схема такої вимірювальної системи. Фотоприймач прямого сонячного випромінювання реєструє тільки прямий потік випромінювання, що досягається встановленням перед ним лінзи, у фокальній площині якої розташований просторовий фільтр низької частоти (рис. 3.3 а). Фотоприймач розсіяного випромінювання перекритий від

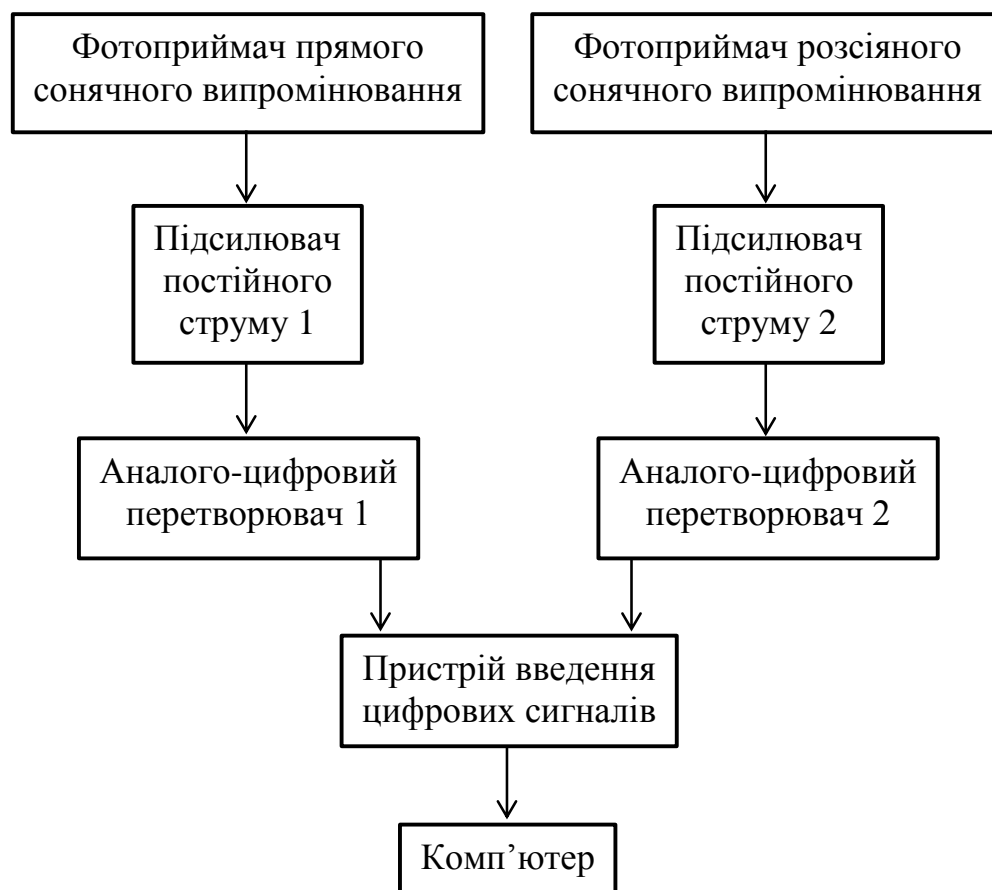


Рис. 3.2 Структурна схема вимірювання інтенсивностей прямого та розсіяного сонячного випромінювання

прямого потоку випромінювання, що досягається вставленням перед ним лінзи, у фокальній площині якої розташований просторовий фільтр високої частоти (рис. 3.3 б).

Фотоелектричні сигнали з обох фотоприймачів підсилюються підсилювачами постійного струму, перетворюються аналого-цифровими перетворювачами в цифрову форму і надходять в комп'ютер через пристрій введення цифрових сигналів. Комп'ютер накопичує та обробляє отримані дані.

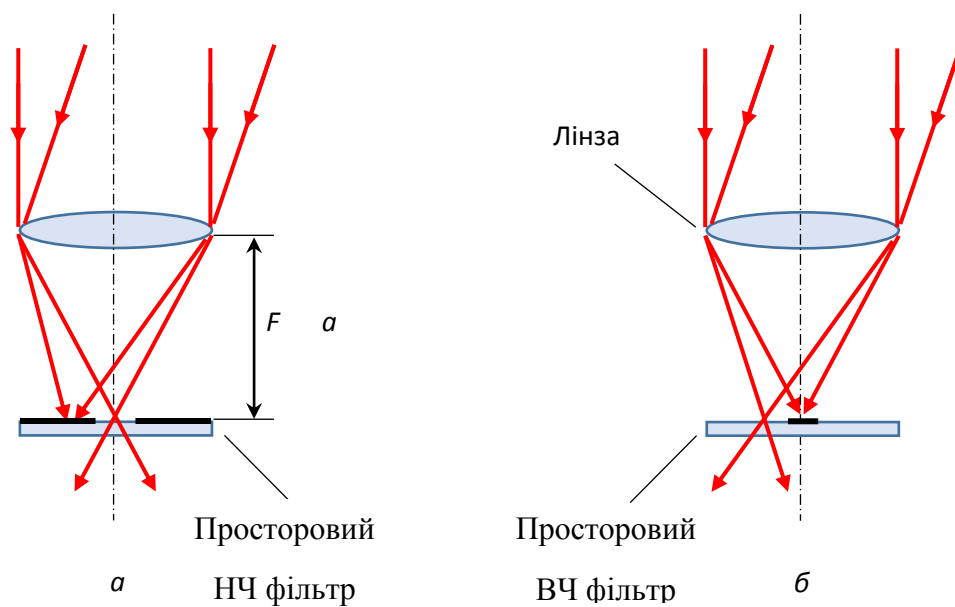


Рис. 3.3 Просторова фільтрація прямого (а) та розсіяного (б) сонячного випромінювання

Висновки до розділу 3

Було розраховано енергію сонячного випромінювання, яку може бути перетворена в електричну на 1 м^2 даху з кутом нахилу 70° для кожного дня року та побудовано графік залежності сонячної енергії, яка падає на 1 м^2 даху з кутом нахилу 70° на широті Києва, від номеру дня.

Сумарна інсоляція в 15 день року дорівнює $1,209\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$.

Вимірювач прямого та розсіяного сонячного випромінювання працює з підсилювачами постійного струму, перетворюються в цифрову форму для надходження в комп'ютер для обробки отриманих даних.

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

ВИСНОВКИ

У дослідженні і розробці використовувались низько-розмірні композитні структури засновані на тонких провідних оксидах і нанопоруватому кремнію. Їх оптичні та електронні властивості модифіковані. ККД таких структур становить 17,4%. А це є вирішальним фактором для покращення існуючих аналогів одночасно з невисокою вартістю.

Вивчено підвищення ефективності ПЕ на основі монокристалічного кремнію при нанесенні тонких плівок наночастинок кремнію на його лицьову поверхню. У дослідженнях були використані наночастинки із середнім діаметром 12 нм, зовнішня оболонка яких була SiO_x ($0 \leq x \leq 2$), та наночастинки діаметром 2,5 нм, покриті октадеценом, здатні до фотолюмінесценції в червоній області спектру.

Було встановлено, що ефективність конверсії SE збільшується до 12% щодо початкового значення зі збільшенням товщини плівки до 400 нм, при застосуванні більш товстих плівок ефективність конверсії зменшується. Аналогічна залежність спостерігається і для струму короткого замикання SE, який збільшується на 15% при застосуванні таких плівок. Величина напруги без навантаження майже не залежить від присутності плівок nc-Si на передній поверхні SE.

З аналізу спектрів відбиття світла від передньої поверхні SE та спектрів пропускання плівок nc-Si, а також вольт-амперних характеристик, виміряних при освітленні SE слабким світлом монохроматичних джерел, спектральні залежності внутрішньої квантової ефективності та наповнення отримано фактор.

Показано, що найбільше збільшення IQE при нанесенні плівок досягається в діапазоні довжин хвиль $\lambda \geq 600$ нм. Відсутність збільшення IQE в області короткохвильового спектру при застосуванні плівок PLnc-Si вказує на те, що ефект перетворення короткохвильової складової падаючого світла в

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Анк
Змн.	Анк.	№ локум.	Пілпис	Дата		52

довгохвильову не відіграє значної ролі в підвищенні ефективності ДП. З аналізу темних вольт-амперних характеристик SE було встановлено, що в зазорі кремнієвої смуги в області р-n-переходу SE є рівні, які виконують роль рекомбінаційних центрів. Застосування плівок nc-Si та PLnc-Si на передній поверхні SE мало впливає на струми рекомбінації, пов'язані з цими центрами, але значно збільшує струми, пов'язані з термічним впорскуванням носіїв.

Основний ефект плівок nc-Si та PLnc-Si чиниться на обернених темних струмах через перехід р-n - SE, значно зменшуючи їх значення. Характер залежності струмів від зворотної напруги вказує на те, що вони визначаються тунелюванням носіїв через р-n перехід. Концентрація електронних рівнів енергії в смугі діапазону, через яку відбувається тунелювання, зменшується, коли плівки nc-Si та PLnc-Si наносяться на передню поверхню SE. Найбільш вірогідними джерелами таких рівнів є Pb та E'-центри. Пасивація цих центрів здійснюється атомами водню, які знаходяться на поверхні наночастинок кремнію, які беруть участь у формуванні плівок.

					ДП.ДЕ62.008.000 ПЗ	Апк
Змн.	Апк.	№ док.	Піппис	Дата		53

Перелік використаної літератури

1. Квантовая точка солнечных батарей. URL: https://ru.qwe.wiki/wiki/Quantum_dot_solar_cell // (дата звернення 05.05.2020)
2. Журнал нано- та електронної фізики. Том 8 №4(2), 04071 (10cc), 2016
3. Optimization of Third Generation Nanostructured Silicon- Based Solar Cells. URL: <https://www.intechopen.com/books/solar-cells-research-and-application-perspectives/optimization-of-third-generation-nanostructured-silicon-based-solar-cells> // (дата звернення 18.05.2020)
4. С.Г. Дорофеев, Н.Н. Кононов, В.М. Звероловлев, К.В. Зиновьев, В.Н. Суханов, Н.М. Суханов. Применение тонких пленок из наночастиц кремния для увеличения эффективности солнечных элементов. Том 48. – Москва, 18 апреля 2013 – 376-383 с.
5. Карпанин О.В., Метальников А.М., Пивкин А.Ю., Соловьев В.А. Получение наноструктурированных тонких пленок методом спрей пиролиза аэрозолей. Пенза, 2014. – 53-56 с.
6. В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева. Класифікація земного покриву карпат з використанням наземного хлорофільного індекса та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра meris, 2014. 30-34с.
7. О.В. Ушкаленко. Визначення оптимального кута нахилу фотоелектричних панелей з урахуванням анізотропної сонячної радіації, 2016. – 40-43с

Додаток А

Лістинг програми MATLAB розрахунку надходження енергії сонячного випромінювання на 1м^2 даху з кутом нахилу 70° для кожного дня року

```
M=[15 44 74 104 135 166 196 227 258 288 318 349];  
%Створення масиву номеру дня середини кожного місяця  
L=51.22; %Широта  
B=70; %Кут нахилу поверхні  
Zs=0; %Кут відхилення поверхні відносно півдня  
  
h=[0:1/60:24]; %Створення масиву часу з кроком 1хв  
sigma=23.45*sind(360/365*(284+M)); %Розрахунок кута  
схилення  
hd=(h-12)*15; %Розрахунок часового кута  
  
hs_1=180/(pi*15)*acos(-tand(L)*tand(sigma(1)));  
%Знаходження проміжку часу від сходу та заходу сонця до  
полудня  
Hours1=[0 4 (12-hs_1) 9.5 12.5 15.5 (12+hs_1) 22 24];  
%Створення масиву часу відповідно до рівня інсоляції  
I_S1=[0 0 0 0.01 0.06 0.01 0 0 0]; %Створення масиву  
інтенсивності прямої радіації (табл. 2.2.1)  
I_D1=[0 0 0 0.09 0.18 0.05 0 0 0]; %Створення масиву  
інтенсивності дифузної радіації (табл. 2.2.1)  
I_S1_i=pchip(Hours1,I_S1,h); %Щохвилинна інтерполяція  
масиву інтенсивності прямої радіації  
I_D1_i=pchip(Hours1,I_D1,h); %Щохвилинна інтерполяція  
масиву інтенсивності дифузної радіації  
alfa_1=180/pi*asin(sind(L)*sind(sigma(1))+cosd(L)*cosd(  
sigma(1))*cosd(hd)); %Розрахунок кута підйому сонця  
протягом дня  
F_1=90-alfa_1; %Знаходження зенітного кута протягом дня  
Z_1=180/pi*acos((cosd(sigma(1))*sind(L)*cosd(hd)-  
sind(sigma(1))*cosd(L))./sind(F_1)); %Розрахунок  
азимутального кута
```

```
teta_1=180/pi*acos(cosd(B)*sind(alfa_1)+sind(B)*cosd(alfa_1).*cosd(abs(Z_1)-Zs)); %Знаходження кута падіння сонячних променів
```

```
RB_1=cosd(teta_1)./cosd(F_1); %Розрахунок коефіцієнта транспозиції інтенсивності прямої радіації
```

```
RD=0.5*(1+cosd(B)); %Розрахунок коефіцієнта транспозиції інтенсивності дифузної радіації
```

```
I_S_1=I_S1_i.*RB_1; %Розрахунок інтенсивності прямої радіації на задану поверхню
```

```
I_D_1=I_D1_i.*RD; %Розрахунок інтенсивності прямої радіації на задану поверхню
```

```
ro_1=0.4; %коефіцієнт відбивання хвойного лісу в зимовий період
```

```
I_R_1=(I_S_1+I_D_1)*ro_1*0.5*(1-cosd(B)); %Розрахунок інтенсивності відбитої радіації на задану поверхню
```

```
I_1=sum(I_R_1+I_S_1+I_D_1); %Розрахунок повної радіації на задану поверхню протягом дня (кал/см^2)
```

```
Insol_1=0.01162*I_1; %Переведення інсоляції в кВт*год/м^2
```

Додаток Б

Лістинг програми MATLAB побудови графіку залежності сонячної енергії, яка падає на 1 м^2 даху з кутом нахилу 70° на широті Києва, від номеру дня

```
Isol=0.01162*[I_1 I_2 I_3 I_4 I_5 I_6 I_7 I_8 I_9 I_10  
I_11 I_12 I_1]; %Створення масиву інсоляції кВт*год/м^2  
xx=linspace(0,365,365); %Створення уявного масиву, при  
значеннях якого буде знайдено значення інсоляції  
Ins=pchip(M,Isol,xx); %Інтерполяція інтенсивності  
сонячної радіації для кожного дня року  
figure(1) %Створення фігури  
plot(xx,Ins,'b');%Побудова графіка  
title('Інтенсивність сонячної радіації протягом року')  
ylabel('Інсоляція, кВт*год/м^2')  
xlabel('Номер дня року')  
grid on
```

SUMMARY

Solar cells on nanoparticles and quantum dots

The diploma project of first educational level "Bachelor" by specialty 171 Electronics, specialization Electronic Instruments and Devices Podobailo Mykola. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Systems. Academic group DE-62. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2020. - 53 p., Ill. 17, tables 3.

Keywords: solar cell; laboratory solar cell; commercial solar cell; thin conductive oxides; internal quantum efficiency; spectral response; colloidal quantum dots.

Summary of the project:

The diploma project presents a review of scientific and technical literature on solar cells, developed using nanoparticles and quantum dots.

Prospects for the use and development of such tools are to increase the efficiency of solar energy with subsequent conversion to generate electricity. This is an important aspect in the development of modern technologies. After all, humanity seeks to minimize the impact of any of its activities on the ecological state of the environment. Therefore, increasing the efficiency of solar cells is a significant driver in this direction.

The first generation of solar cells was created using monocrystalline silicon (c-Si) substrates. Thanks to the use of poly- and multi-crystals of silicon, it was possible to reduce the cost of solar cells. However, this affected efficiency. The second generation was based on thin film technology, using materials such as amorphous silicon (a-Si) silicon films, cadmium telluride (CdTe) films and indium

gallium copper selenide films (CuInGaSe₂). This technology has helped increase the efficiency of solar panels, as well as reduce manufacturing costs. The third generation uses nano-technologies, nanocrystals and nanosized composite structures. These structures are based on quantum dots and nanoporous materials, and they also have altered optoelectronic properties. They are also used in solar cells that have absorption bands leading to a 65% improvement in energy conversion efficiency, which virtually doubles the quality of existing solar panels.

NANOSTRUCTURED SOLAR CELLS

Nanostructured solar cells offer several advantages for solar cells including; (1) the ability to exceed a single junction solar cell efficiency by implementing new concepts; (2) the ability overcome practical limitations in existing devices, such as tailoring the material properties of existing materials or using nanostructures to overcome constraints related to lattice matching and; (3) the potential for low cost solar cell structures using self-assembled nanostructures. The multiple potential uses for nanostructures show why there is large interest in these approaches, since they may be able to improve on current technology, whether in high efficiency or lowest \$/Wp. Further, since they offer both higher efficiency and low cost, they offer the potential to circumvent both existing efficiency and cost drivers. While nanostructured solar cells have significant potential to advance photovoltaics, there are also substantial challenges. The efficiency even of precisely grown devices such as MBE-grown structures is presently lower than devices without the nanostructures. Further, experimentally demonstrated advances in nanostructure solar cells using lower cost approaches often rely on absorption/emission mechanisms which do not necessarily correlate to the ability to make devices. Moreover, nanostructured devices do not achieve large absorption (the easiest solar cell parameter to control), much less the collection, voltage, and FF of existing semiconductor devices. Given these challenges as well as the large number of options and approaches for nanostructured solar cells, it is important to examine nanostructured approaches which may have a practical contribution in the

short to medium term and to identify approaches and key challenges in reaching the potential of nanostructured solar cells. This paper examines the options for nanostructured solar cells and identifies key research areas in nanostructures photovoltaics, focusing on components necessary to allow nanostructured PV to contribute to high efficiency devices.

Table 1: New concept approaches to solar cells.

Assumption in Shockley-Queisser	Approach which circumvents assumption	Examples
Input is solar spectrum	Multiple spectrum solar cells: take the input spectrum and transform to one with same energy but narrower wavelength range	Up/down conversion Thermophotonics
One photon = one electron-hole pair	Multiple absorption path solar cells: any absorption path in which one photon \neq one-electron hole pair	Impact ionization Two-photon absorption
One quasi-Fermi level separation	Multiple energy level solar cells: Existence of multiple meta-stable light-generated carrier populations within a single device	Intermediate band Quantum well solar cells
Constant temperature = cell temperature = carrier temperature	Multiple temperature solar cells. Any device in which energy is extracted from a difference in carrier or lattice temperatures	Hot carrier solar cells
Steady state (\approx equilibrium)	AC solar cells: Rectification of electromagnetic wave.	Rectenna solar cells

CONCLUSION

While there is substantial research required to realize a fully a nanostructured, low cost solar cell, certain aspects are more immediately applicable to high efficiency solar cells and serve as a route towards a high performance low-cost nanostructured solar cell. Virtual band gap solar cells for

conversion of low energy photons have the advantage of being able to use phenomena demonstrated in existing semiconductor devices, coupled with the relatively lower efficiency of pn junctions in this energy range. Other approaches with potential in the short term focus on using nanostructured to enhance performance of existing solar cells, such as improved light trapping or reducing the effects of lattice mismatch. In order to have the largest impact, the demonstration of nanostructures using low cost approaches with improved transport properties is essential. A closely-spaced ordered array of quantum dots allows implementation of any of the potential uses of nanostructures. Nanostructures without long range order have a challenge in demonstrating efficient transport.

An increase in the efficiency of SE based on single-crystal silicon when applying thin films of silicon nanoparticles to its front surface has been studied. The studies used nanoparticles with an average diameter of 12 nm, the outer shell of which was SiO_x ($0 \leq x \leq 2$), and nanoparticles with a diameter of 2.5 nm, coated with octadecene, capable of photoluminescence in the red region of the spectrum. It was found that the conversion efficiency of SE increases up to 12% relative to the initial value with increasing film thickness to 400 nm, with the application of thicker films, the conversion efficiency decreases. A similar dependence is observed for the short-circuit current SE, which increases by 15% when applying such films. The magnitude of the no-load voltage is almost independent of the presence of nc-Si films on the front surface of the CE.

From the analysis of the light reflection spectra from the front surface of SE and the transmission spectra of nc-Si films, as well as volt-ampere characteristics measured when illuminating SE with weak light monochromatic sources, the spectral dependences of intrinsic quantum efficiency and filling factor were obtained. It is shown that the largest increase in IQE when applying films is achieved in the wavelength range $\lambda \geq 600$ nm. The absence of an increase in IQE in the short-wavelength region of the spectrum when applying PLnc-Si films indicates that the effect of converting the short-wavelength component of incident

light into long-wavelength does not play a significant role in increasing the efficiency of SE.

From the analysis of the dark volt-ampere characteristics of SE, it was found that in the silicon band gap in the region of the p-n junction of SE there are levels that act as recombination centers. The application of nc-Si and PLnc-Si films on the front surface of the CE has little effect on the recombination currents associated with these centers, but significantly increases the currents associated with thermal injection of carriers.

The main effect of the nc-Si and PLnc-Si films is exerted on the inverse dark currents through the p-n - CE transition, significantly reducing their value. The nature of the dependence of currents on the reverse voltage indicates that they are determined by tunneling the carriers through the p-n junction. The concentration of electronic energy levels in the band gap through which tunneling occurs decreases when nc-Si and PLnc-Si films are applied to the front surface of the CE. The most probable sources of such levels are Pb and E'-centers. Passivation of these centers is carried out by hydrogen atoms, which are on the surface of silicon nanoparticles involved in the formation of films.